

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Antun Premec

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Izv.Prof.Dr.Sc. Danijel Pavković

Student:

Antun Premec

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Danijelu Pavkoviću na prihvatanju mentorstva za ovaj rad i na ukazanom strpljenju i korisnim savjetima.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antun Premec**

Mat. br.: 0035192275

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Dimenzioniranje baterije i projektiranje sustava upravljanja besprekidnog napajanja zasnovanog na solarnim panelima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Battery sizing and control system design for an uninterruptible power supply based on solar panels**

Opis zadatka:

Jedna od značajnijih primjena elektrokemijskih baterija je u besprekidnim i pričuvnim izvorima napajanja, odnosno sustavima za regulaciju tokova snage u izoliranim mikromrežama. Za kvalitetan rad sustava besprekidnog napajanja potrebno je pravilno dimenzionirati i parametrirati bateriju, odnosno projektirati odgovarajuće sustave regulacije tokova snage. U radu je potrebno napraviti sljedeće:

1. Dati kratki pregled tehnologija elektrokemijskih baterija, te opisati Theveninov model nadomjesnog strujnog kruga za olovnu bateriju 12 V, a koji uključuju nabojni kapacitet, te serijski otpor i napon otvorenog kruga.
2. Opisati princip rada fotonaponskih (solarnih) panela i dati matematičke modele izlazne struje i izlazne snage u ovisnosti o naponu na stezaljkama i trenutnoj snazi solarnog zračenja, te principe rada i nadomjesne modele frekvencijskih pretvarača za rad na istosmjernoj (DC) sabirnici.
3. Na temelju poznatih profila opterećenja i izlazne snage fotonaponskog panela treba dimenzionirati kapacitet pohrane olovne baterije, pri čemu je potrebno ostvariti da baterija radi u području stanja napunjenosti između 40% i 60% u normalnom radu.
4. Dodatno je potrebno zadovoljiti tehnološke parametre rada sustava besprekidnog napajanja uz dovoljnu zalihu pohrane energije (stanje napunjenosti baterije ne smije izaći izvan „sigurnih“ granica od 20% do 80%) za izvanredne slučajeve kao što su ispad potrošača (nema potrošnje) ili ispad fotonaponskih panela (nema proizvodnje) unutar 24 sata rada.
5. Na temelju prikazanog matematičkog modela potrebno je projektirati sustav regulacije snage baterije.
6. Funkcionalnost predloženog sustava za pohranu energije zasnovanog na elektrokemijskoj bateriji i projektiranih sustava regulacije tokova snage treba ispitati simulacijama na računalu.

Zadatak zadan:

24. travnja 2017.

Rok predaje rada:

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Danijel Pavković

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

Sadržaj

Sadržaj	I
Popis slika	III
Popis tablica	V
Popis oznaka	VI
Sažetak.....	1
1. Uvod	2
2. Elektrokemijske baterije.....	3
2.1. Podjela ćelija i baterija	4
2.1.1. Primarne baterije i ćelije	4
2.1.2. Sekundarne baterije i ćelije	4
2.1.3. Rezervne baterije.....	5
2.1.4. Gorive ćelije	5
2.2. Rad ćelije	6
2.2.1. Pražnjenje	6
2.2.2. Punjenje.....	7
2.3. Teorijski napon, kapacitet i energija ćelije	8
2.3.1. Slobodna energija	8
2.3.2. Teorijski napon	8
2.3.3. Teorijski kapacitet (Coulmbov kapacitet)	8
2.3.4. Teorijska energija	9
3. Rad baterije	10
3.1. Pražnjenje- pad napona prilikom pražnjenja.....	10
3.2. Pražnjenje – jačina električne struje	12
3.3. Način pražnjenja baterije	13
3.4. Gubici u bateriji	17
3.5. Procesi na elektrodama.....	20
4. Olovne baterije	21
4.1. Vrste olovnih baterija	21
4.2. Stacionarne baterije	22
4.2.1. Konstrukcija stacionarnih baterija.....	22

4.2.2.	Karakteristike baterije	22
5.	Theveninov model baterije	24
5.2.	Matematički model baterije	26
6.	Fotonaponski paneli	29
6.1.	Fotonaponske ćelije.....	31
6.1.1.	Poluvodička dioda	32
6.1.2.	Izravna pretvorba sunčeva zračenja u električnu energiju.....	33
6.2.	Solarni fotonaponski sustavi	36
6.2.1.	Samostalni fotonaponski sustavi	36
6.3.	Matematički model fotonaponskih ćelija.....	37
6.4.	Parazitski otpor FN ćelije	39
7.	Frekvencijski pretvarači snage.....	42
8.	Dimenzioniranje baterije	44
9.	Regulacije DC sabirnice.....	48
9.1.	Optimum dvostrukog odnosa.....	48
9.2.	DC sabirnica	49
9.3.	Regulacija podređenog kruga struje baterije	49
9.4.	Regulacija napona	50
9.5.	Analiza regulatora napona DC sabirnice	51
10.	Zaključak.....	55
11.	Literatura	56

Popis slika

Slika 1 Pražnjenje ćelije	6
Slika 2 Električna shema punjenja ćelije.....	8
Slika 3 Pad napona ćelije prilikom pražnjenja	11
Slika 4 Naponska karakteristika pražnjenja.....	12
Slika 5 Sekvencijalno pražnjenje baterije	12
Slika 6 Usporedba načina pražnjenja baterije za konstantno opterećenje	14
Slika 7 Usporedba načina pražnjenja za isto vrijeme pražnjenja	15
Slika 8 Usporedba načina pražnjenja za istu krajnju snagu.....	15
Slika 9 Slučaj isprekidanog pražnjenja na kapacitet baterije.....	16
Slika 10 Strujno naponska karakteristika ćelije	18
Slika 11 Vodljivost elektrolita	19
Slika 12 Tafel-ova jednadžba	20
Slika 13 Karakteristike pražnjenja olovne baterije	22
Slika 14 Utjecaj temperature na kapacitet olovne baterije.....	23
Slika 15 Theveninov nadomjesni strujni krug.....	24
Slika 16 Theveninov otpornički model baterije	25
Slika 17 Modificirani kvazi-statički model baterije.....	26
Slika 18 Blokovski dijagrami baterija: a) struja na ulazu modela, b) napon na ulazu modela, c) model baziran na protoku snage	28
Slika 19 Godišnje sunčevo zračenje na površini Zemlje u usporedbi sa zalihama fosilnih nuklearnih goriva te godišnjom potrošnjom energije u svijetu	29
Slika 20 Oblici i pretvorbe sunčeve energije zračenja	30
Slika 21 Prikaz raspodjele ukupne dozračene energije u vremenskom periodu od 10 godina.....	30
Slika 22 Prosječna dnevna dozračena energija po mjesecima u vremenskom periodu od 10 godina..	31
Slika 23 Osnovni prikaz p-n spoja fotonaponske ćelije	32
Slika 24 Dioda - zaporni spoj i propusni spoj.....	33
Slika 25 Silicijeva solarna ćelija.....	34
Slika 26 Nastanak parova elektrona i šupljina u solarnoj ćeliji.....	35
Slika 27 Solarna ćelija kao izvor električne energije.....	35
Slika 28 Podjela fotonaponskih sustava	36
Slika 29 Samostalni fotonaponski sustav	37
Slika 30 Ekvivalentni električni strujni krug fotonaponske ćelije	37
Slika 31 I-U karakteristika fotonaposke ćelija sa i bez osvjetljenja	39
Slika 32 Ekvivalentna električna shema fotonaponskog panela sa serijskim otporom.....	39
Slika 33 Utjecaj serijskog otporra na I-U karakteristiku ćelije	40
Slika 34 Ekvivalentna električna shema FN ćelije s paralelnim parazitskim otporom.....	40
Slika 35 Utjecaj paralelnog parazitskog otpora na I-U karakteristiku FN ćelije.....	40
Slika 36 Evivalentna električna shema s uključenim serijskim i paralelnim parazitskim otporom	41
Slika 37 DC-DC pretvarači	42
Slika 38 Prijenosne karakteristike DC-DC pretvarača	43
Slika 39 Profili snaga fotonaponske ćelije	44
Slika 40 Stanje napunjenosti baterije uz najmanji profil predane energije	46
Slika 41 Stanje napunjenosti uz profil snage s najviše predane energije.....	46
Slika 42 Ispad fotonaponskih ćelija	47

Slika 43 Stanje napunjenosti baterije u slučaju ispada trošila	47
Slika 44 Model DC veze	49
Slika 45 Nadomjesni krug struje	49
Slika 46 Kaskadna struktura regulatora napona DC sabirnice.....	50
Slika 47 Pojednostavljeni model regulacije napona DC sabirnice	50
Slika 48 Simulink model DC sabirnice	52
Slika 49 Kriterij optimuma dvostrukog odnosa	52
Slika 50 Odziv napona sabirnice	53
Slika 51 Odziv podređenog regulacijskog kruga struje.....	53
Slika 52 Bodeovi dijagrami otvorenog regulacijskog kruga podešenog prema simeričnom optimumu	54

Popis tablica

Tablica 1 Parametri solarnih ćelija	36
Tablica 2 Prijenosna karakteristika DC-DC pretvarača	43
Tablica 3 Energija profila izlazne snage fotonaponskih panela	45
Tablica 4 Parametri regulatora.....	51

Popis oznaka

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
ΔG^o	J	Slobodna energija
F	Ah	Faradejeva konstanta
N		Broj elektrona
E^o	V	Broj elektrona
I	A	Struja pražnjenja
C	Ah	Kapacitet baterije
n	h	Vrijeme pražnjenja
M		Multiplikator
P	W	Snaga
E	Wh	Izlazna energija
V	V	Napon
E_0	V	Elektromotorna sila
$(\eta_{ct})_a$	V	Aktivacijska polarizacija anode
$(\eta_{ct})_c$	V	Aktivacijska polarizacija katode
$(\eta_c)_a$	V	Koncentracijska polarizacija anode
$(\eta_c)_c$	V	Koncentracijska polarizacija katode
i	A	Struja ćelije
R_i	Ω	Unutarnji otpor ćelije
η	V	prenapon
SoC		Stanje napunjenosti
Q_{bat}	Ah	Napunjenost baterije
Q_{max}	Ah	Maksimalna napunjenost baterije
$u_b(s)$	V	Napon baterije u s domeni
$i_b(s)$	A	Struja baterije u s domeni
R_b	Ω	Otpor baterije
R_p	Ω	Gubici polarizacije
$\tau_p(s)$	s	Vremenska konstanta polarizacije
U_{oc}	V	Napon otvorenog kruga
W_{bat}	Ah	Energija baterije
P_{bat}	W	Snaga baterije
P_{max}	W	Maksimalna snaga
I_{max}	A	Maksimalni napon na stezaljkama
U_{max}	V	Maksimalna izlazna struja baterije
I_d	A	Struja diode
I_z	A	Struja zasićenja
e	C	Elementarni naboj

U	V	Napon
k	J/K	Boltzmanova konstanta
T	K	Termodinamička temperatura
h	Js	Planckova konstanta
ν	Hz	Frekvencija elektromagnetskog zračenja
c_0	m/s	Brzina svjetlosti
λ	μm	Valna duljina
I_{pp}	A	Struja fotonaponskog izvora
I_o	A	Reverzna struja zasićenja
V_d	V	Napon diode
a		Faktor idealnosti diode
T_e	K	Temperatura ćelije
d		Faktor vođenja
T_u	s	Vremenski period vođenja
T_i	s	Vremenski period isključene sklopke
D_2, D_3		Karakteristični odnosi
T_e	s	Ekvivalentna vremenska konstanta
u_{dc}	V	Napon punjenja
u_{dcR}	V	Referentni napon
i_{dc}	A	Struja punjenja
C_{dc}	F	Kapacitet sabirnice
i_L	A	Struja tereta
T_{dc}	s	Vremenska konstanta sabirnice
$T_{\Sigma i}$	s	Parazitska vremenska konstanta
T_{ei}	s	Vremenska konstana strujnog kruga
T_{uf}	s	Vremenska konstanta filtra napona
$A(s)$		Karakteristični polinom
$G(s)$		Prijenosna funkcija

Sažetak

U ovom radu dimenzionirana je baterija i projektiran je sustav upravljanja besprekidnog napajanja. Dan je pregled tehnologija i opći princip rada elektrokemijskih baterija kao i pobliži uvid u olovne baterije. Prikazan je matematički model baterije u obliku Theveninovog nadomjesnog modela strujog kruga. Dan je i uvid u tehnologiju fotonaponskih panela koji su predviđeni kao primarni izvor energije u zadanoj mikromreži koja je povezana DC sabirnicom čija regulacija napona je prikazana u radu. Simulacija i regulacija istosmjerne mikromreže provedene su u programskom paketu Matlab.

1. Uvod

Razvojem tehnologija raste i potrebna količina energije kao i njezina pristupačnost kako bi se omogućio daljnji razvoj i efektivna upotreba postojećih tehnologija. Jedan od glavnih zahtjeva za izvor energije je što manji negativan utjecaj na okoliš, ali uz pristupačnost i pouzdanost u isporuci energije. Sadašnji izvori energije su u većini fosilna goriva, hidroelektrane i nuklearne elektrane koje imaju veliki utjecaj na okoliš i njegovu bioraznolikost. Fosilna goriva zagađuju okoliš svojim izgaranjem, preradom i nepravilnim skladištenjem. Nuklearni izvori energije zahtijevaju visoke sigurnosne standarde i u slučaju nesreće ostavljaju dugotrajne štetne posljedice dok hidroelektrane utječu na bioraznolikost i reljef područja u kojem se nalaze. Jedna od alternativa konvencionalnim izvorima energije je sunčeva energija koja je ekološki prihvatljiva i dovoljan izvor energije za potrebe čovječanstva koji je s razvojem tehnologije sve pristupačniji i korišteniji u prilikama kad su konvencionalni izvori energije nedostupni ili neisplativi.

Za sakupljanje sunčeve energije zračenja koriste se fotonaponski paneli koji su poluvodički elementi i koji se u posljednje vrijeme sve češće primjenjuju u praksi zbog pada cijene potrebne opreme kao i porasta njihove učinkovitosti. Ovo znači da se fotonaponski paneli mogu upotrebljavati kao primarni izvori energije u područjima gdje su standardni izvori električne energije nedostupni ili neisplativi ili kao sredstvo uštede uz već postojeći izvor električne energije. Jedan od glavnih pokretača sve veće upotrebe fotonaponskih panela je razvoj baterija koje omogućuju skladištenje energije pretvorbom električne energije u kemijsku energiju. Obnovljivi izvori energije u paru s baterijama služe za izradu mikromreža koje omogućuju pristup električnoj energiji izvan područja pokrivenih standardnim izvorima električne energije. Baterije se također koriste u brojnim uređajima kako bi im se omogućila mobilnost i korištenje u teško pristupačnim područjima, također se mogu koristiti kao primarni izvori energije, gdje su baterije jedini izvor energije, što je sve češći slučaj u automobilske industriji.

U ovom radu je opisano skladištenje (pohrana) energije u baterijama elektrokemijskim pretvorbama s fotonaponskim panelima kao izvorom električne energije. Kako bi se omogućio konstantan pristup električnoj energiji i kako bi izvor bio prilagođen upotrebi, fotonaponski paneli i baterija povezani su u mikromrežu pri čemu je baterija dimenzionirana temeljem poznatih profila proizvodnje i potrošnje električne energije. U radu je također projektiran i sustav upravljanja tokovima snage temeljen na regulaciji napona istosmjernice.

2. Elektrokemijske baterije

Baterije su uređaji koji pretvaraju kemijsku energiju sadržanu u aktivnim materijalima u električnu energiju pomoću elektrokemijskih reakcija oksidacije-redukcije. U slučaju sustava koji se može ponovno puniti proces je obrnut. Ta reakcija se izvodi prijelazom elektrona s jednog materijala na drugi kroz električni krug. Baterija se sastoji od 3 glavna dijela koji su anoda, katoda i elektrolit. Anoda je negativna elektroda koja predaje elektrone električnom krugu i oksidira prilikom elektrokemijske reakcije, katoda je pozitivna elektroda i prima elektrone iz električnog kruga i reducira se prilikom elektrokemijske reakcije. Elektrolit ili ionski vodič služi kao medij za prijenos naboja obično je tekućina, voda ili neko drugo otapalo u kojem su otopljene soli, kiseline ili lužine koje utječu na ionsku vodljivost. Glavni zahtjevi za izbor materijala katode i anode su da budu što lakši i da ćelijama u kojima se nalaze daju visoki izlazni napon i kapacitet. Neka od ograničenja u izboru materijala za katode i anode su reaktivnost s drugim komponentama ćelije, polarizacija, cijena, utjecaj na okoliš i druge. Prilikom praktične izvedbe anoda je izabrana pomoću sljedećih kriterija: efikasnost reduciranja materijala, specifični kapacitet baterije, provodnost, stabilnost, zahtjevi prilikom proizvodnje i niska cijena. U praktičnim izvedbama za anodu se najčešće koriste metali kao što su cink, koji ima dobra elektrokemijska svojstva pa zatim litij, najlakši metal, koji ima visoku elektrokemijsku ekvivalenciju. Litij se često koristi zbog svojih povoljnih svojstva i razvoja prikladnih i kompatibilnih elektrolita i konstrukcija ćelija koje mogu kontrolirati litijevu aktivnost. Jedan od materijala koji se koristi kao anoda je vodik, koji se mora nalaziti u nekom spremniku što umanjuje njegovu elektrokemijsku ekvivalenciju. Za katodu je potrebno koristiti materijal koji ima dobra oksidacijska svojstva, da bude stabilan u kontaktu s elektrolitom i da ima odgovarajuću razinu radnog napona. Kisik potreban za oksidaciju se može uzimati direktno iz okoliša kao što je slučaj u cink/kisik bateriji. Najčešće korišteni materijali za katodu su metalni oksidi. Drugi materijali korišteni za izradu katoda su materijali na bazi halogenih elemenata i njihovi oksidi, sumpor i njegovi oksidi i koriste se samo kod posebnih baterijskih sustava. Elektrolit baterije mora imati dobru ionsku vodljivost, ali ne smije imati električnu vodljivost zato što bi se u suprotnom pojavio unutarnji kratki spoj. Druge važne karakteristike je da odabrani elektrolit ne reagira s materijalima od kojih su elektrode izrađene, da su promjene svojstva u ovisnosti o temperaturi male, da bude siguran za rukovanje i niske cijene. Većina elektrolita su otopine na bazi vode, uz neke iznimke, kao što su termalne baterije i baterije s litijskom anodom, koje koriste tekuću sol i ostale elektrolite koji nisu na bazi vode kako bi se izbjegla reakcija anode s elektrolitom. U

praktičnim izvedbama baterija ugrađuje se razdjelni materijal između katode i anode kako bi se smanjila mogućnost pojavljivanja kratkog spoja, taj materijal mora biti porozan kako bi se osigurala ionska vodljivost. U elektrode se ponekad dodaju vodljivi materijali kako bi se smanjio unutarnji otpor u elektrodama i uslijed toga manji gubici izlazne snage baterije. Baterijske ćelije se izrađuju u puno različitih oblika i konfiguracija kao na primjer, cilindrična, plosnata, prizmatična i druge. Različiti oblici ćelija zahtijevaju i različite oblike komponenti ćelije kako bi se smanjila veličina baterija. Postoje različiti načini zatvaranja baterije kako bi se spriječilo istjecanje elektrolita koji je često štetan za okoliš i zdravlje. Neke izvedbe baterija imaju ispušne sustave koji omogućuju istjecanje nakupljenih plinova unutar baterije. Kako bi baterije bile potpune i upotrebljive dodaju se zaštitna kućišta, priključci i oznake.

2.1. Podjela ćelija i baterija

Glavna podjela ćelija i baterija ovisi o mogućnosti ponovnog električnog punjenja. Primarne baterije i ćelije nisu ponovno punjive dok su sekundarne predviđene za ponovno punjenje. Unutar te podjele postoje još potpodjela koje omogućuju podjelu prema pojedinim strukturama ili konstrukcijama.

2.1.1. Primarne baterije i ćelije

Primarne baterije i ćelije nemaju mogućnost jednostavnog i efektivnog ponovnog punjenja i nakon pražnjenja se odbacuju. U većini primarnih ćelija elektrolit je sadržan unutar upijajućeg materijala ili separatora tako da nema slobodnog ili tekućeg elektrolita, te ćelije se nazivaju „suhe ćelije“. Primarne baterije su praktičan, jeftin i lagan izvor električne energije za prijenosne elektroničke i električne uređaje, rasvjetu, memoriju i drugo. Glavna prednost pripranih baterija je dugo vrijeme skladištenja, visoka gustoća energije pri umjereno niskim stopama pražnjenja i niski zahtjevi za održavanjem. Primarne baterije većih dimenzija nalaze primenu za vojne svrhe, signalizaciju i druge. Većina primarnih baterija se sastoji od jedne ćelije i cilindričnog su oblika.

2.1.2. Sekundarne baterije i ćelije

Sekundarne baterije ili ćelije imaju mogućnost električnog punjenja na njihovo početno stanje tako što se na njih narine struja suportnog smjera od onog struje pražnjenja baterije. Te baterije su uređaji za pohranjivanje električne energije koji su još poznati kako „akumulatori“. Područje primjene sekundarnih baterija spada u dvije glavne kategorije:

1. Primjene u kojima sekundarne baterije služe kao spremnici energije koji su uglavnom spojeni i pune se putem glavnog izvora energije i predaju akumuliranu energiju po potrebi. Primjeri su automobilska industrija, brzi failsafe sustavi napajanja i pričuveni izvori energije, hibridna vozila i sustavi stacionarnog spremanja energije za održavanje konstantne razine elektirčne struje.
2. Primjene u kojima su sekundarne baterije korištene kao primarni izvor energije i koriste se kao primarne baterije, ali se nakon korištenja ponovno pune. Primjeri korištenja sekundarnih baterija kao primarnih su potrošačka elektronika, prijenosni alati, električna vozila, gdje je ekonomičnije koristiti punjivu bateriju umjesto odbacivanja primarne i u primjenama gdje zahtjevi za enegrijom nadilaze one koje mogu predati primarne baterije.

Sekundarne baterije imaju veću gustoću snage, veću brzinu pražnjenja, ravnu karakteristiku pražnjenja i dobre karakteristike prilikom rada na niskoj temperaturi. Gustoća snage sekundarnih baterija je manja u odnosu na primarne baterije kao i sposobnost zadržavanja naboja, ali se taj izgubljeni naboj lako vraća ponovnim punjenjem baterije. Neke baterije mogu obnoviti razinu naboja tako da se ne nabijena elektroda zamijeni s nabijenom, najčešće je to anoda, takve baterije se nazivaju „mehanički punjive baterije“, primjeri takvih baterija su cink-zrak i aluminij-zrak baterije.

2.1.3. Rezervne baterije

Rezervne baterije su baterije pripremljene i optimirane za dugotrajne periode u kojima se neće koristiti. U tom slučaju jedna komponenta se izolira od ostataka baterije kako ne bi došlo do degradacije elektrolita ili do efekta samopražnjenja. Najčešći dio baterije koji se izolira je elektrolit. Rezervne baterije su konstruirane na takav način da zadovoljavaju zahtjeve, kao što su ekstremno dugo stajanje ili skladištenje u zahtjevnom okolišu, kod kojih standardne (kontinuirano aktivne) baterije nisu u mogućnosti ispuniti tražene zahtjeve. U nekim izvedbama kao što je termalna baterija, baterija je neaktivna sve dok se ne zagrije iznad temperature taljenja skrućenog elektrolita koji prilikom promjene agregatnog stanja postane vodljiv. Rezerve baterije se često koriste kad je potrebno predati veliku količinu energije u relativno kratkom vremenskom roku, neki od primjera su projektili, torpeda ili drugi sustavi naoružanja.

2.1.4. Gorive ćelije

Gorive ćelije su, kao baterije, elektrokemijske galvanske ćelije koje pretvaraju kemijsku energiju u električnu energiju. Dije le iste karakteristike kao i baterije osim što im aktivni

materijal nije integrirani dio baterije već se donosi elektrodama. Materijali od kojih su izrađene elektrode su inertni i ne troše se tijekom reakcije u ćeliji i imaju svojstva katalizatora koji pojačava efekt redukcije i oksidacije aktivnih materijala. Anodni aktivni materijali koji se koriste u gorivim ćelijama su uglavnom u plinovitom ili tekućem agregatnom stanju, za razliku od metalnih korištenih u baterijama, i dovodi se putem anodne strane gorive ćelije. Materijali korišteni za anodne materijale su uglavnom goriva koja se koriste u toplinskim motorima. Za katodni materijal najčešće se koristi kisik ili zrak i u gorivu ćeliju se hrani putem katodne strane gorive ćelije. Gorive ćelije se razmatraju kao održiva zamjena za konvencionalne motore i koriste u svemirskim vozilima više od 40 godina. Gorive ćelije su podjeljene u dvije glavne kategorije:

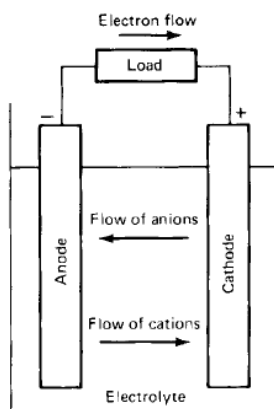
1. Direktni sustav u kojem gorivo, npr. vodik, metanol ili drugi, reagira unutar gorive ćelije
2. Indirektni sustav u kojem se gorivo, kao što je prirodni plin ili neko drugo fosilno gorivo, prvo mora pretvoriti u plin bogat vodikom i zatim dobiti u gorivu ćeliju.

Konfiguracije gorivih ćelija ovisi o kombinaciji goriva i oksidanta, elektrolitu, temperaturi, primjeni i drugih varijabli.

2.2. Rad ćelije

2.2.1. Pražnjenje

Kada se na ćeliju spoji vanjsko trošilo, elektroni počinju teći od anode, koja se oksidira, kroz vanjsko trošilo do katode koja prihvata elektrone i materijal katode se reducira. Električni krug je zatvoren pomoću elektrolita u kojem anioni teku od katode do anode i kationi od anode do katode. Taj električni krug je prikazan na slici 1.



Slika 1 Pražnjenje ćelije

Proces pražnjenja može se prikazati stehiometrijskim jednadžbama gdje se na lijevoj strani nalaze reaktanti, sudionici koje ulaze u proces i s desne strane produkti, spojevi koji nastaju nakon reakcije. Proces pražnjenja prikazan je uz pretpostavku da je za materijal anode korišten metal Cink, a za materijal katode klor(Cl_2).

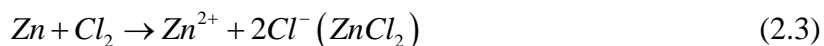
Reakcija negativne elektrode naziva se oksidacija i rezultati su kation materijala anode i gubitak elektrona i prikazana je sljedećom stehiometrijskom jednadžbom:



Reakcija pozitivne elektrode naziva se redukcija i njezini rezultati su anioni materijala katode i prihvatanje elektrona i prikazana je sljedećom stehiometrijskom jednadžbom:



Ukupni proces pražnjenja prikazan je idućom jednadžbom:



2.2.2. Punjenje

Tijekom punjenja sekundarnih i rezervnih baterija struja teče u suprotnom smjeru od smjera pražnjenja i proces oksidacije se javlja na pozitivnoj elektrodi, a proces redukcije na negativnoj elektrodi. Kako se po definiciji anodom naziva elektroda na kojoj se javlja proces oksidacije i katodom elektroda na kojoj se javlja proces redukcije, pozitivna elektroda se smatra anodom, a negativna elektroda katodom. Na primjeru cink/klor ćelije reakcija punjenja prikazana je sljedećim stehiometrijskim jednadžbama.

Proces punjenja na negativnoj elektrodi, katodi naziva se redukcija i tvari se dodaju elektroni:



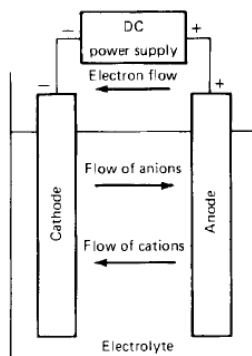
Proces punjenja na pozitivnoj elektrodi, anodi naziva se oksidacija i tvar gubi elektrone:



Ukupni proces punjenja prikazan je idućom stehiometrijskom jednadžbom:



Shema procesa je prikazana na slici 2.



Slika 2 Električna shema punjenja ćelije

2.3. Teorijski napon, kapacitet i energija ćelije

Teorijski napon i kapacitet ćelije su funkcije koje ovise o materijalima anode i katode.

2.3.1. Slobodna energija

Svaki put dok se pojavi reakcija u ćeliji dolazi do smanjenja ukupne slobodne energije u sustavu čija se promjena izražava sljedećim izrazom:

$$\Delta G^o = -nFE^o \quad (2.7)$$

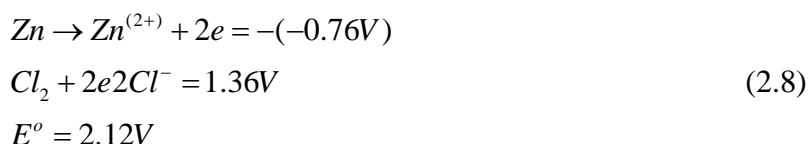
Gdje je:

- F = Faradejeva konstanta iznosa 26.8 Ah ili približno 96.500 C
- N = broj elektrona koji se pojavljuju u stehiometrijskoj reakciji
- E^o = standardni potencijal za dani materijal, V

2.3.2. Teorijski napon

Standardni potencijal ćelije je određen vrstom aktivnih materijala. Može se izraziti pomoću slobodne enegrije ili izmjeriti eksperimentom. Standardni potencijal ćelije se može izraziti iz standardiziranih potencijala elektroda tako da se izračuna razlika između standardnog potencijala katode i anode.

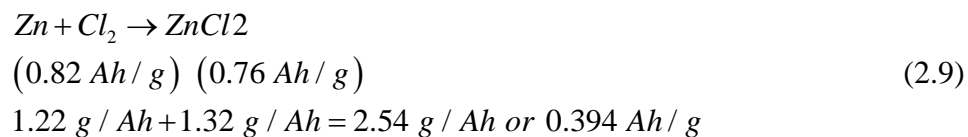
Kao primjer dan je izračun standardnog potencijala ćelije cink/klorid



2.3.3. Teorijski kapacitet (Coulmbov kapacitet)

Teorijski kapacitet ćelije određen je količinom aktivnih materijala u ćeliji. Izražen je kao ukupna količina elektriciteta uključenog u elektrokemijskoj reakciji i mjerna jedinica mu je coulomb [C] ili amper-sat [Ah]. Teorijski kapacitet elektrokemijske ćelije, ovisno o aktivnim materijalima, izračunava se iz ekvivalentne težine reaktanata. Na primjeru spoja

Zn/Cl_2 specifični teorijski kapacitet iznosi 0.394 Ah/g kao što je prikazano na idućoj stehiometrijskoj jednažbi.



Teorijski kapacitet se izračunava samo u ovisnosti o aktivnim materijalima što znači da utjecaj vode, elektrolita i drugih materijala nije uključen u proračun teorijskog kapaciteta.

2.3.4. Teorijska energija

Kapacitet ćelije se također promatra i s obzirom na energiju elektrokemijske ćelije koja uzima u obzir napon i količinu elektriciteta u obzir. Teorijska energije je maksimalna vrijednost koju može predati određeni elektrokemijski sustav:

$$\text{Watthour (Wh)} = \text{voltage (V)} \times \text{ampere-hour (Ah)} \quad (2.10)$$

Što bi za slučaj Zn/Cl_2 iznosilo :

$$(\text{Watthours/gram}) = 2.12 \text{ V} \times 0.394 \text{ Ah/g} = 0.835 \text{ Wh/g ili } 835 \text{ Wh/kg} \quad (2.11)$$

3. Rad baterije

Pošto se teorijska energija i dostupna energija razlikuju potrebno je pravilno odrediti ponašanje baterije tijekom korištenja. Mnogi faktori utječu na radne karakteristike baterije i potrebno ih je uzeti u obzir kako bi se baterije pravilno koristile i imale što dulji vijek trajanja. Zbog mogućnosti interakcije faktora oni su generalizirani i utjecaj tih faktora može biti znatno različit u radnim uvjetima u odnosu na laboratorijske uvjete. Na primjer, utjecaj skladištenja je izraženiji kod visokih temperatura i dugih perioda skladištenja i kod većih brzina pražnjenja. U danom periodu skladištenja smanjenje kapaciteta baterije će biti veće kod većih brzina pražnjenja nego kod manjih. Kod niskih temperatura smanjenje kapaciteta baterije će biti veće kod brzog pražnjenja nego kod sporijeg. Standardi i specifikacije baterije obično sadrže uvjete normalnog rada u kojima baterija isporučuje istaknute vrijednosti.

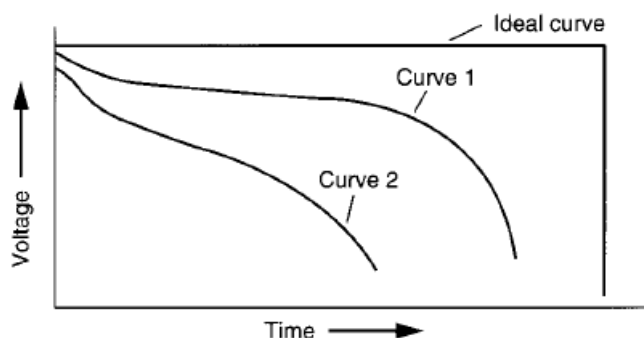
3.1. Pražnjenje- pad napona prilikom pražnjenja

Napon se promatra u mnogo različitim slučajeva i on je opisan sljedećim izrazima:

- Teorijski napon – funkcija materijala katode i anode, sastava elektrolita i temperature, obično se izražava za 25°C
- Napon otvorenog kruga – napon kada je baterija neopterećena i taj napon je približan teorijskom naponu
- Napon zatvorenog kruga – napon kada je baterija opterećena
- Nominalni napon – napon koji se uzima kao srednji operacijski napon
- Radni napon – prikazuje stvarni iznos napona prilikom rada opterećene baterije i uvijek je niži od napona otvorenog kruga
- Srednji napon – prosječni napon prilikom pražnjenja baterije
- Krajnji ili cut-off napon – napon kod kraja pražnjenja baterije. To je uglavnom napon iznad kojeg je većina energije baterije predana trošilu. Krajnji napon ovisi o primjeni baterije.

Prilikom pražnjenja baterije njen napon je niži od teorijskog napona. Razlika u naponima je izazvana ohmskim gubicima i gubicima polarizacije aktivnih materijala. Pad napona je prikazan na slici 3. U idealnom slučaju pražnjenje baterije se provodi na razini teorijskog napona dok se ne potroše aktivni materijali i iskorišten je sav kapacitet baterije, tad napon pada na nulu. U stvarnim uvjetima, krivulja pražnjenja ima oblik kakav je prikazan na slici 3. Početni napon pražnjenja je manji od teorijskog napona zbog unutarnjeg otpora ćelije i tijekom pražnjenja dalje opada zbog ohmskih gubitaka i gubitaka polarizacije. Napon također

pada tijekom pražnjenja zato što se povećava otpor ćelije zbog povećanja broja produkata pražnjenja, aktivacijske i koncentracijske polarizacije i drugih faktora. Krivulja „Curve 2“ prikazuje ćeliju koja ima veći unutarnji otpor ili veću brzinu pražnjenja od krivulje „Curve 1“. Porastom brzine ili struje pražnjenja, napon pražnjenja pada i karakteristika pražnjenja je strmija.



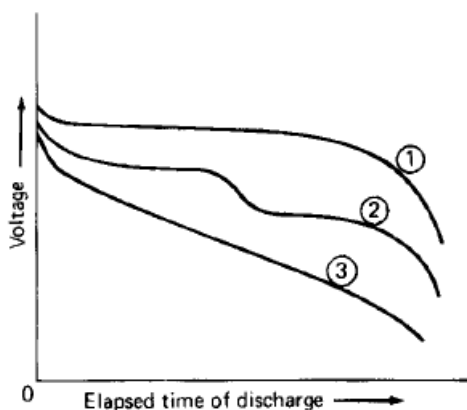
Slika 3 Pad napona ćelije prilikom pražnjenja

Po ovome grafu može se zaključiti da specifična energija predana sa strane baterije je u praksi manja od teorijske energije njenih aktivnih materijala. Uzrok tome je prosječni napon pražnjenja koji je niži od teorijskog napona i to što se baterija ne prazni do nula volti te nije iskorišten njen teoretski raspoloživi kapacitet.

Specifična energija je opisana jednadžbom

$$Wh / g = U \cdot Ah / g \quad (3.1)$$

Oblik karakteristike pražnjenja se mijenja ovisno o elektrokemijskom sustavu, konstrukcijskim značajkama i drugim uvjetima pražnjenja. Nekoliko primjera je prikazano na slici 4. Krivulja 1 prikazuje pražnjenje gdje je utjecaj reaktanta i reakcijskih produkata minimalan sve dok se aktivni materijali ne iskoriste u većoj mjeri. Krivulja 2 prikazuje pražnjenje u 2 koraka koja prikazuje promjenu u mehanizmu reagiranja i potencijala aktivnih materijala. Treća krivulja prikazuje slučaj promjene sastava aktivnih materijala, reaktanata, unutarnjeg otpora tijekom pražnjenja i njihov utjecaj na napon pražnjenja.

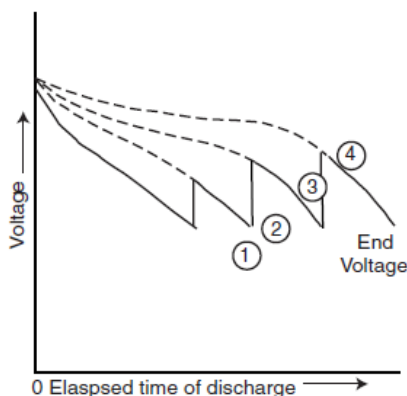


Slika 4 Naponska karakteristika pražnjenja

3.2. Pražnjenje – jačina električne struje

Povećanjem jačine struje pražnjena baterije povećavaju se i ohmski gubici i efekt polarizacije, napon pražnjenja se smanjuje kao i vrijeme pražnjenja baterije. Na slici 5 su prikazane karakteristike napona pražnjenja uz povećanje struje pražnjenja. Najstrmija krivulja prikazuje slučaj s najvećom jakosti struje i vidi se da se u tom slučaju baterija najbrže isprazni dok se postupnim smanjenjem struje napon pražnjenja sve više približava teorijskom naponu i kapacitetu. Smanjenjem struje povećava se i vrijeme pražnjenja čime se umanjuje utjecaj degradacijskih efekata koji smanjuju efektivni kapacitet baterije.

Ako baterija dosegne krajnji napon kod određene jakosti struje, vrijeme pražnjenja baterije može se povećati smanjenjem struje koje za posljedicu ima povećanje napona i produljenje vremena pražnjenja. Na taj način se primarne baterije mogu koristiti u više namjena. Moguće je i unaprijed definirati period pražnjena baterije s različitim opterećenjem koristeći samo jednu bateriju, ali nije moguće opisati cijelu karakteristiku pražnjenja baterije za različita opterećenja kao što se vidi na slici 5.



Slika 5 Sekvencijalno pražnjenje baterije

Za određivanje struje pražnjenja koristimo nekoliko metoda. Za izračun struje pražnjenja pomoću „C“ rate metode koristi se sljedeća formula:

$$I = M \times C_n \quad (3.2)$$

Gdje je:

- I – struja pražnjenja [A]
- C – numerička vrijednost kapaciteta baterije [Ah]
- n – vrijeme, izraženo u satima, za deklariranu brzinu pražnjenja
- M – multiplikator kapaciteta (I/C_n)

Hourly Rate je metoda za određivanje struje kod koje će se baterija isprazniti za određeni broj sati.

„E“ rate računa izlaznu snagu baterije pošto se sve češće koriste baterijski sustavi s konstantnim izlazom snage. Metoda je analogna „C“ rate metodi:

$$P = M \times E_n \quad (3.3)$$

Gdje je:

- P – snaga [w]
- E – numerička vrijednost izlazne energije izražene watt satima [Wh]
- n – vrijeme, izraženo u satima, za deklariranu brzinu pražnjenja
- M – multiplikator energetske kapaciteta (P/E_n)

3.3. Način pražnjenja baterije

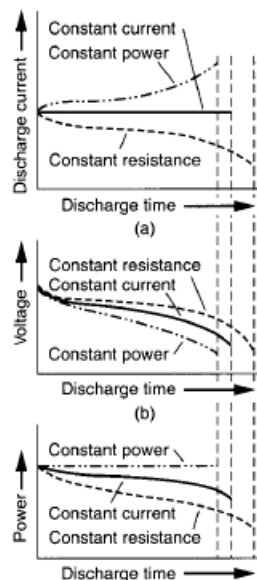
Način pražnjenja ima velik utjecaj na rad baterije. Prilikom pražnjenja baterije to neke određene krajnje točke baterija će trošiti uvijek predati jednak broj amper sati neovisno o načinu pražnjenja baterije. Tijekom pražnjenja struja pražnjenja se mijenja ovisno o načinu pražnjenja.

Tri osnovna načina po kojima se baterije prazne su:

- Konstantni otpor – otpor trošila je konstantan tijekom pražnjenja što znači da se struja smanjuje proporcionalno sa smanjenjem napona baterije
- Konstantna struja – tijekom pražnjenja struja ostaje konstantna
- Konstantna snaga – Struja raste tijekom pražnjenja baterije dok se napon smanjuje kako bi iznos snage ostao isti

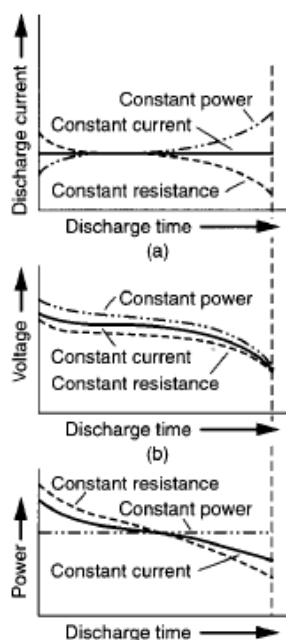
Načini pražnjenja su uspoređeni za isto opterećenje, za iste radne sate i za istu krajnju izlaznu snagu.

U nastavku su prikazani grafovi koji uspoređuju sva tri načina pražnjenja u sva tri slučaja.



Slika 6 Usporedba načina pražnjenja baterije za konstantno opterećenje

Na slici 6 su prikazani grafovi koji prikazuju promjenu struje pražnjenja, napona i snage u sva tri načina pražnjenja baterije za konstantno opterećenje. Vidljivo je da način pražnjenja konstantne snage najbrže predaje energiju uz najstrmiji pad napona i porast struje. Kod načina pražnjenja konstantne struje javlja se srednje vrijeme pažnjenja, pad napona i pad snage. Kod načina pražnjenja konstantnog otpora bateriji je potrebno najdulje vrijeme da preda energiju uz najsporiji pad napona, struje i snage.

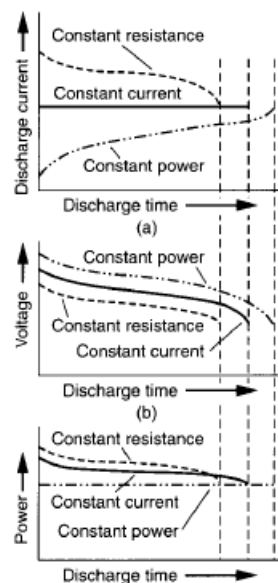


Slika 7 Usporedba načina pražnjenja za isto vrijeme pražnjenja

Na slici 7 prikazana je usporedba sva 3 načina načina pražnjenja za isto vrijeme pražnjenja na određeni krajnji napon. Kod načina pražnjenja konstantne snage. Kod konstantne snage struja raste zbog pada napona prikazanog sljedećim izrazom:

$$I = P / V \quad (3.4)$$

Kod konstantne struje javlja se postepeni pad napona i pad snage s tim da su početni napon i snaga niži od početnog napona konstantne snage i početne snage konstantnog otpora. Kod konstantnog otpora imamo pad snage, napona i struje pražnjenja.



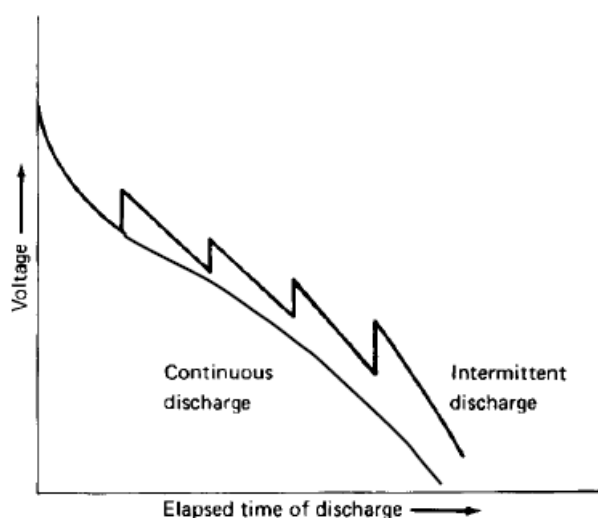
Slika 8 Usporedba načina pražnjenja za istu krajnju snagu

Sa stajališta primjene najrealniji slučaj je da je snaga u sva ti načina rada jednaka na kraju pražnjenja zato što električni i elektronički uređaji imaju minimalnu potrebnu snagu kako bi radili sa navedenim radnim karakteristikama. U tom slučaju opterećenja su odabrana tako da je na kraju pražnjenja izlazna snaga jednaka za sva 3 načina pražnjenja i to na razini snage koja je potrebna za normalan rad opreme koju baterija napaja. Kod konstantnog otpora snaga, napon i struja padaju prilikom pražnjenja. U ovom slučaju način rada konstantnog otpora pruža najkraće vrijeme pražnjenja zato što baterija mora osigurati minimalnu snagu kod prekidnog napona što znači da u početnoj fazi pražnjenja može prisutna visoka razina struje pražnjenja.

U načinu rada s konstantnom strujom razina struje pražnjenja se održava na toj razini kako bi snaga na prekidnom naponu bila na zadovoljavajućoj razini. Prosječna struja pražnjenja je niža nego kod konstantnog otpora što ujedno znači da je i vrijeme pražnjenja dulje.

U načinu rada konstantne snage struja je najniža na početku pražnjenja i postepeno raste s padom napona baterije kako bi snaga bila konstantna. Prosječna struja pražnjenja je najniža u ovom načinu rada što donosi do zaključka da je i vrijeme pražnjenja dulje.

Kada baterija prestane predavati energiju vanjskom trošilu dolazi do određenih kemijskih i fizikalnih promjena koje rezultiraju povećanju napona baterije. Zbog te pojave će doći do napona pilastog oblika kako je prikazano na slici 9 (slučaj intermitiranog ili isprekidanog pražnjenja) zbog kojeg će se produljiti vrijeme pražnjenja.



Slika 9 Slučaj isprekidanog pražnjenja na kapacitet baterije

Utjecaj isprekidanog pražnjenja pražnjenja na kapacitet je veći kod viših struja pražnjenja. Vrijeme potrebno za oporavak napona i sam iznos napona ovisi o mnogim faktorima kao što su konstrukcijske značajke baterije, temperatura pražnjenja, krajnji napon i drugi.

3.4. Gubici u bateriji

Baterije i ćelije su elektrokemijski uređaji koji pretvaraju kemijsku energiju u električnu pomoću elektrokemijskih reakcija oksidacije i redukcije koje se provode na elektrodama. Maksimalna električna energija koju kemikalije mogu predati koja se nalazi unutar ili se pridonosi elektrodama u ćelijama ovisi o promjeni slobodne energije ΔG elektrokemijskog para. Tijekom oslobađanja energije dolazi do gubitaka koji su izazvani polarizacijom koja se javlja prilikom prolaska struje tereta kroz elektrode prilikom elektrokemijskih reakcija. Ti gubici uključuju:

- 1) Aktivacijsku polarizaciju – gubitak energije na pokretanje elektrokemijske reakcije na površini elektrode
- 2) Koncentracijsku polarizaciju – pojavljuje se zbog razlike u koncentraciji reaktanata i produkata koji se javljaju na površini elektroda prilikom elektrokemijske reakcije

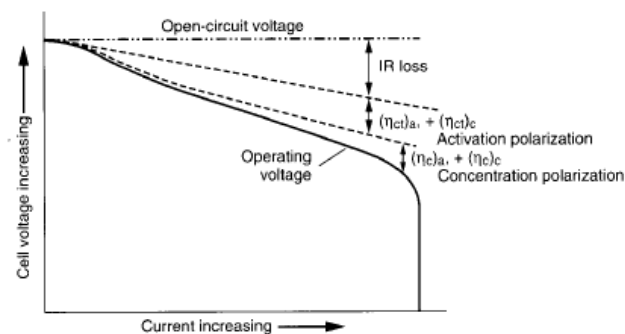
Ti procesi polarizacije koriste dio raspoložive energije baterije i ta energija izlazi iz sustava u obliku toplinske energije što znači da sva teorijski dostupna energija u ćeliji nije upotrebljiva. U praksi je teško odrediti iznos tih gubitaka zbog strukture elektroda koje su uglavnom kompozitni materijali izađeni od aktivnog materijala, veziva, aditiva za povećanje preformansi i vodljivih punila. Elektrode su uglavnom porozne i tanke i zbog toga je potrebna kompleksno matematičko modeliranje da bi se procijenio utjecaj polarizacije. Važan utjecaj na rad baterije ima i unutarnja impedancija ćelije koja izaziva pad napona prilikom rada i iskorištava dio teorijske energije i pretvara ga u toplinske gubitke. Gubici zbog unutarnje impedancije se nazivaju ohmska polarizacija i proporcionalna je jačini struje u sustavu. Ukupna unutarnja impedancija je zbroj ionskog otpora elektrolita, koji se nalazi između separatora i poroznih elektroda, električnog otpora aktivne mase, električni spojevi na elektrodama i kontaktni otpor između aktivne mase i kolektora struje. Ti gubici su omski otpori koji se opisuju Ohm-ovim zakonom što znači da je veza između struje i pada napona linearna. Kada se baterija spoji na vanjsko opterećenje R , napon ćelije E se se računa pomoću izraza:

$$E = E_0 - \left[(\eta_{ct})_a + (\eta_c)_a \right] - \left[(\eta_{ct})_c + (\eta_c)_c \right] - iR_i = iR \quad (3.5)$$

Gdje je:

- E_0 – elektromotorna sila ili napon ćelije otvorenog strujnog kruga
- $(\eta_{ct})_a, (\eta_{ct})_c$ – aktivacijska polarizacija ili prijenos naboja na katodi i anodi
- $(\eta_c)_a, (\eta_c)_c$ – koncentracijska polarizacija na katodi i anodi
- i – struja ćelije prilikom opterećenja
- R_i – unutarnji otpor ćelije

Kao što je prikazano na slici 10 korisni napon koji predaje ćelija umanjen je polarizacijom i ohmskim gubicima. Samo kod vrlo niskih struja, kad su ohmski gubici mali, ćelija može raditi na naponu približnom naponu otvorenog kruga i predati većinu teorijski slobodne energije. Utjecaj polarizacijskih gubitaka prikazan je na slici 10.



Slika 10 Strujno naponska karakteristika ćelije

Slobodna energija baterije ili ćelije ovisi o osnovnim elektrokemijskim reakcijama na elektrodama, ali ima puno faktora koji utječu na opseg prijenosa naboja, stopu difuzije i gubitke. Ti faktori uključuju konstrukciju i oblik elektrode, vodljivost elektrolita, svojstva separatora i druge. Postoje osnovna pravila, zasnovana na elektrokemijskim principima, koja su važna prilikom konstruiranja baterije i gorivih ćelija kako bi se postigla visoka efikasnost s minimalnim gubicima.

Pravila za konstruiranje ćelija:

1. Vodljivost elektrolita mora biti dovoljno visoka kako bi ohmski gubici bili na zadovoljavajućoj razini. Baterije su uglavnom konstruirane za određene jačine struje pražnjenja, polazeći od miliampera do nekoliko stotina ampera. Ovisno o elektrolitu, ćelije se mogu konstruirati tako da imaju dulje vrijeme pražnjenja. To se postiže tako da se poveća površina elektroda i korištenjem tankog separatora kako bi se smanjili ohmski gubici. Primjer su ćelije sa spiralnim

elektrodama. Na slici 11 su prikazani elektroliti i njihove vodljivosti na sobnoj temperaturi.

Electrolyte system	Specific conductivity, $\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$
Aqueous electrolytes	$1-5 \times 10^{-1}$
Molten salt	$\sim 10^{-1}$
Inorganic electrolytes	$2 \times 10^{-2}-10^{-1}$
Organic electrolytes	$10^{-3}-10^{-2}$
Polymer electrolytes	$10^{-7}-10^{-3}$
Inorganic solid electrolytes	$10^{-8}-10^{-5}$

Slika 11 Vodljivost elektrolita

2. Elektrolitske soli i otopine trebaju imati kemijsku stabilnost kako bi se izbjegla direktna kemijska reakcija s materijalima katode i anode.
3. Brzina reakcije katode i anode treba biti dovoljno visoka kako aktivacijska polarizacija ne bi bila previsoka, a u kojem slučaju bi ćelija bila neupotrebljiva. Uobičajena metoda smanjenja aktivacijske polarizacije je korištenje elektroda s poroznom strukturom. Porozne elektrode imaju veliku dodirnu površinu i smanjuje lokalnu gustoću struje za neku određenu razinu struje.
4. U većini baterija i gorivih ćelija dio ili svi reaktanti proizlaze iz elektroda i produkti reakcija se moraju odmaknuti od površine elektrode difuzijom ili gibanjem. Ćelija bi trebala na zadovoljavajući način podržati gibanje elektrolita kako bi se osiguralo gibanje produkata kemijskih reakcija i izbjegla pretjerana koncentracijska polarizacija. Kako bi se osigurala funkcionalnost ćelije potrebno je koristiti elektrode pravilne poroznosti i dimenzija pora, separator pravilne debljine i strukture i zadovoljiti potrebnu koncentraciju reaktanta u elektrolitu.
5. Materijal kolektora struje (vanjskih izvoda ćelije) mora biti kompatibilan s materijalom elektrode kako ne bi došlo do korozije. Konstrukcija kolektora mora imati jednoliku distribuciju struje i niski kontaktni otpor.
6. Za punjive ćelije poželjno je da produkti reakcija ostanu na površini elektrode kako bi se olakšala reverzibilna reakcija kod punjenja i pražnjenja. Reakcijski produkti trebaju biti mehanički i kemijski stabilni s elektrolitom.

Aspekti koji se ispituju kako bi se osigurala što bolja funkcionalnost baterija su brzina reakcije elektroda, postojanje posrednih koraka reakcije, stabilnost elektrolita, kolektori struje,

materijali elektrode, uvjeti transfera materijala, limit struje, pojavljivanje otpornog filma na površini elektrode, impedancijske karakteristike elektrode ili ćelije i drugi.

3.5. Procesi na elektrodama

Reakcije na elektrodama opisane su kao kemijske i električne heterogene promjene. Reakcije na elektrodama mogu biti jednostavne kao redukcija iona metala i ugradnja rezultirajućeg atoma u strukturu elektrode. Unatoč jednostavnosti reakcije, mehanizam ukupnog procesa može biti relativno kompleksan i često ima više od jednog koraka. Elektroaktivni materijali moraju biti prenešeni od površine elektrode pomoću gibanja elektrolita ili difuzijom prije pomaka elektrona. Upijanje elektroaktivnog materijala može se provoditi prije ili poslije pomaka elektrona. Ukupna brzina elektrokemijskog procesa je određena brzinom najsporije reakcije u procesu.

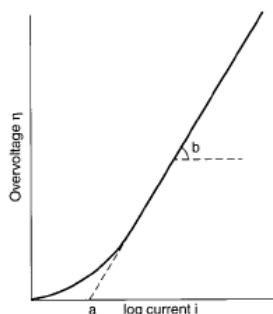
Kada sustav uđe u neravnotežno stanje kao što je tok struje izazvan polarizacijom elektrode dolazi do promjene u elektrokemijskim reakcijama. Eksperimentom je utvrđeno da je funkcija koja opisuje strujno naponsku karakteristiku elektrokemijskih sustava eksponencijalna. Izraz kojim se to prikazuje zove se Tafel-ova jednadžba.

$$\eta = a \pm b \log i \quad (3.6)$$

gdje je:

- η – prenapon
- i – struja
- a, b – konstante

Tafel-ova jednadžba je prikazana na slici 12.



Slika 12 Tafel-ova jednadžba

4. Olovne baterije

Kao aktivni materijal koriste olovni dioksid, za pozitivnu elektrodu, i metalno olovo, koje ima poroznu strukturu velike površine, kao negativni aktivni materijal. Kako bi se poboljšale karakteristike elektroda one se legiraju antimonom. Obrada aktivnih materijala sastoji se od miješanja i procesa zagrijavanja na različitim temperaturama, pri različitim vlažnostima i duljinama trajanja procesa zagrijavanja. Zagrijane ploče aktivnih materijala se sastoje od olovnog sulfata, olovnog oksida i olova koji sadrži 5% mase ploče. Elektrolit korišten u olovnim baterijama je otopina sumporne kiseline. Olovne baterije se najčešće primjenjuju u skladištenju energije, kao izvori energije u slučaju nužde, u električnim i hibridnim vozilima i vozilima na fosilna goriva kao pokretači motora, za osvjetljenje vozila i paljenje motora također se koriste i u komunikacijskim uređajima, sigurnosnoj rasvjeti, električnim alatima i drugim. Razlog širokog spektra primjene olovnih baterija u različitim konstrukcijama, veličinama i razinama napona je njihova niska cijena i jednostavan proces proizvodnje, te mogućnost recikliranja preko 90% aktivnog materijala baterije.

Prednosti olovnih baterija u odnosu na druge baterije su niska cijena, čiji razlog je proizvodnja na lokalnoj bazi odnosno dostupnost materijala, imaju dobre preformanse na niskim i visokim temperaturama, mogu postići visoki napon, jednostavna provjera razine napona. Olovne baterije su dostupne u velikim količinama i u raznim veličinama i konstrukcijama. Nedostaci olovnih baterija su kratki životni ciklus, ograničena gustoća energije, dugo stajanje u ispražnjenom stanju može dovesti do polarizacije elektroda, moguće je pojavljivanje vodika koji izaziva eksplozije i drugi.

4.1. Vrste olovnih baterija

SLI (starting-lighting-ignition) olovne baterije se koriste za pokretanje, osvjetljenje i paljenje. Konstruirane su kao plosnate lijepljenje ploče i koriste se u automobilske industriji, pomorstvu, u letjelicama, motorima pogonjenim dizelom i kao stacionarni izvori energije.

Trakcijske olovne baterije su plosnate lijepljenje baterije, cjevaste i štapne ploče i koriste se u industriji prilikom transporta materijala.

Pogonske olovne baterije imaju istu konstrukciju kao i trakcijske i koriste se u vozilima pogonjenim električnom energijom.

Stacionarne olovne baterije konstruirane kao cjevaste i plosnate ploče i koriste se kao izvori energije u nuždi, poravnanje opterećenja, signalizaciju i besprekidne sustave napajanja.

Prijenosne olovne baterije su konstruirane kao cjevaste i plosnate lijepljenje ploče i koriste se u instrumentima, prijenosnim alatima, sustavima osvjetljenja i drugima.

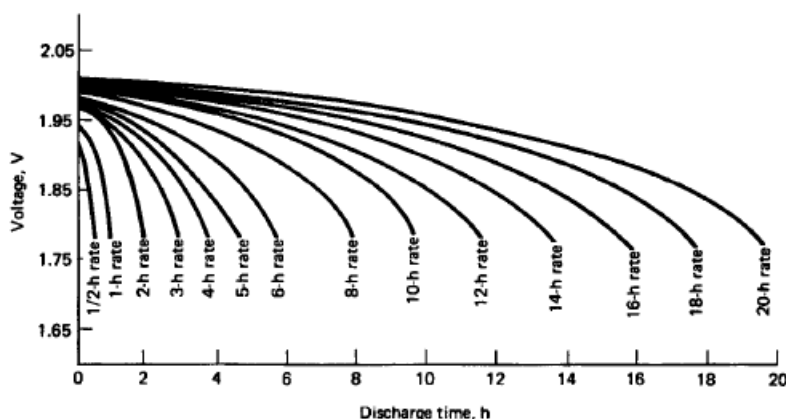
4.2. Stacionarne baterije

4.2.1. Konstrukcija stacionarnih baterija

Stacionarne baterije su teže i veće u odnosu na druge olovne baterije što im omogućuje dulji radni vijek i sadrže značajnu količinu (višak) elektrolita kako bi se umanjila potreba za održavanjem (nadopunjavanjem) pa je kapacitet ograničen samo pozitivnom elektrodom koja ima naveći utjecaj na karakteristike i vijek trajanja baterije. Sve stacionarne baterije koriste lijepljene ploče s n pozitivnih ploča i $n+1$ negativnih ploča. Takva konstrukcija se koristi zbog širenja pozitivnih ploča tijekom eksploatacije. Dvije vanjske negativne ploče su uobičajeno tanje od ostalih zato što je na rubovima otežano punjenje.

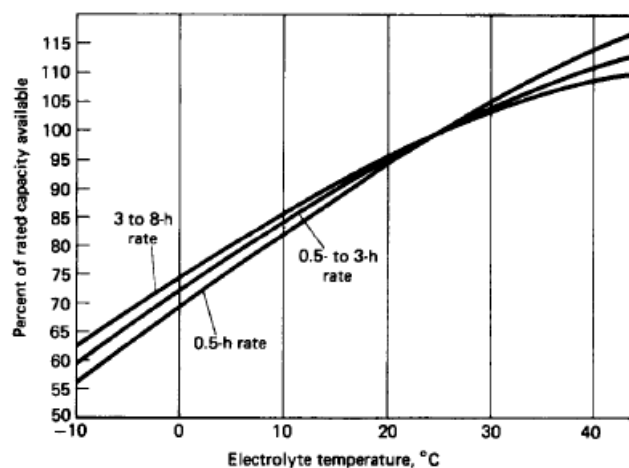
4.2.2. Karakteristike baterije

Baterije za stacionarnu primjenu koriste plosnate lijepljenje pozitivne ćelije, cijevaste, Plante ili Manchester pozitivne ćelije. Karakteristike pražnjenja, kod 25 °C, za različite brzine pražnjenja baterije prikazane su na slici 13.



Slika 13 Karakteristike pražnjenja olovne baterije

Optimalna temperatura korištenja stacionarnih baterija je od 20°C do 30°C, a raspon temperature u kojima je moguć normalan rad baterije je od -40°C do 50°C. Utjecaj temperature na kapacitet baterije prikazan je na slici 14.



Slika 14 Utjecaj temperature na kapacitet olovne baterije

Visoke temperature potiču proces samopražnjenja baterije, smanjuju životni vijek baterije i druge loše posljedice dok niske temperature umanjuju kapacitet baterije.

5. Theveninov model baterije

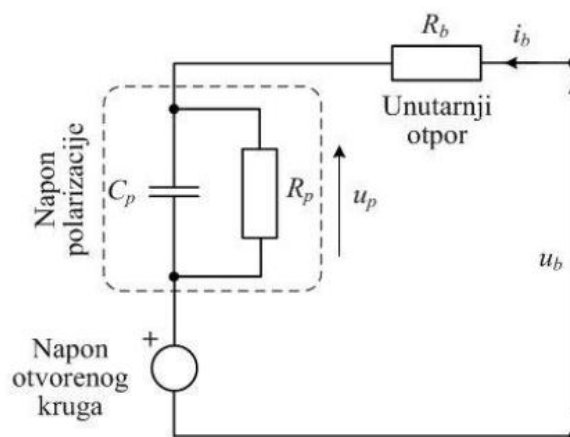
Theveninov model baterije je nadogradnja na jednostavan model baterije koji zanemaruje nelinaerne ovisnosti parametara modela o stanju napunjenosti, temperature i punjenju ili pražnjenju. Theveninov model baterije se koristi za opisivanje dinamičkih karakteristika baterije i sastoji se od idealnog naponskog izvora U_{oc} , unutarnjeg otpora R_b i paralelnog RC spoja parazitske kapacitivnosti C_p , koji predstavlja kapacitivnost paralelnih ploča baterije, i prijelaznog otpora R_p koji opisuje nakupljanje naboja i difuzijske učinke na elektrodama. Naponski izvor U_{oc} prikazuje napon otvorenog kruga kada je baterija neopterećena. Parazitska kapacitivnost predstavlja kapacitivnost paralelnih ploča baterije i prijelaznog sloja između ploča i elektrolita dok unutarnji otpor R_b predstavlja otpor izazvan kontaktnom pločom i elektrolita. Svi elementi modela imaju konstantne iznose, koji u realnom modelu ovise o napunjenosti baterije dok polarizacijski i unutarnji otpor baterije ovisi o jačini struje i temperaturi rada baterije. Napunjenost baterije ili State of Charge izražen je slijedećom jednačinom:

$$SoC = \frac{Q_{bat}}{Q_{max}} \quad (5.1)$$

$$Q_{bat} = \int i_{bat} dt \quad (5.2)$$

Gdje Q_{bat} označuje preostali naboj baterije i Q_{max} označuje ukupni naboj baterije koji ovisi o struji pražnjenja baterije I_b .

Theveninov nadomjesni strujni krug je prikazan na slici 15.



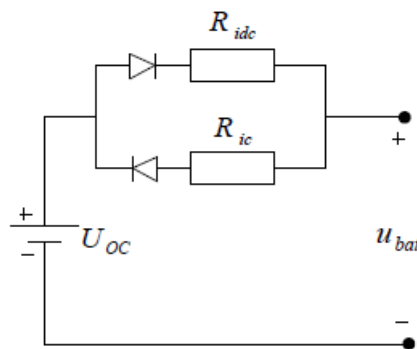
Slika 15 Theveninov nadomjesni strujni krug

Baterija je opisana linearnim modelom prvog reda u s -domeni:

$$u_b(s) = i_b(s) R_b + \frac{R_p i_b(s)}{\tau_p s + 1} + U_{oc} \quad (5.3)$$

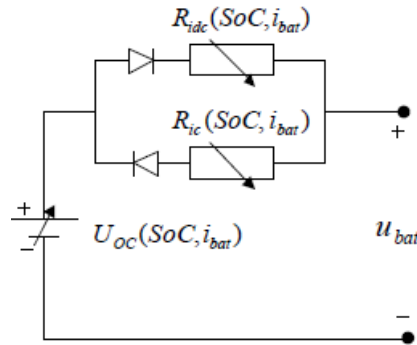
Gdje prvi član s desne strane opisuje pad napona uslijed unutarnjeg otpora, drugi član opisuje pad napona polarizacije U_p koji je prikazan pomoću pomoćnog strujnog kruga koji se sastoji od kapaciteta C_p i otpora R_p i zadnji član je napon otvorenog kruga. Napon u_b predstavlja izlazni napon na stezaljkama baterije i struja i_b predstavlja struju pražnjenja baterije.

Otpornički Theveninov model prikazan je na slici 16. Prikazani model zanemaruje kapacitivnost ploča baterije, ali uključuje radne otpore prilikom punjenja R_{ic} i pražnjenja baterije R_{idc} . U ovom spoju diode, koje se služe samo za potrebe modeliranja i smatraju se idealnima, prikazuju smjer struje prilikom procesa punjenja i pražnjenja i uključuju i isključuju otpore iz kruga. Oba otpora su radni gubici koji ovise o trenutnom stanju napunjenosti baterije ili struje punjenja ili pražnjenja baterije što se u ovom modelu baterije ne uzima u obzir.



Slika 16 Theveninov otpornički model baterije

Uzimanjem u obzir i stanje napunjenosti baterije dobiva se modificirani kvazi-statički model baterije prikazan na slici 17. Primjenom ovog modela napon otvorenog kruga U_{oc} i otpori pražnjenja i punjenja R_{ic} , R_{idc} ovise o stanju napunjenosti baterije SoC. Taj model se izvodi tako da se otpori prilikom punjenja i pražnjenja pretvaraju u promjenjive otpore.



Slika 17 Modificirani kvazi-statički model baterije

5.2. Matematički model baterije

Akumulirana energija baterije jednaka je integralu snage baterije koja je prikazana kao umnožak napona na stezaljkama baterije u_{bat} i izlazne struje baterije i_{bat} u kojem napon na stezaljkama ovisi o stanju napunjenosti i struji baterije:

$$W_{bat} = \int_0^T u_{bat}(SoC, i_{bat}) i_{bat} dt \quad (5.4)$$

Energija baterije se može izraziti i pomoću kapaciteta naboja izražavanje naboja baterije strujom baterije $Q_{bat} = \int i_{bat} dt$ za koji također vrijedi $Q_{bat} = SoC \cdot Q_{max}$. Uvrštavanjem ovih izraza u izraz (5.3) uz pretpostavku da je napon na stezaljkama baterije konstantan $u_{bat} = U_{bat}$ dobivamo izraz za W_{bat} .

$$W_{bat} = U_{bat} \cdot SoC \cdot Q_{max} \quad (5.5)$$

Promjena stanja napunjenosti baterije izražava se deriviranjem jednadžbe (5.1) i uvrštavanjem jednadžbe (5.2):

$$\frac{dSoC}{dt} = \frac{1}{Q_{max}} \frac{dQ_{bat}}{dt} = \frac{i_{bat}}{Q_{max}} \quad (5.6)$$

Jednadžbom ravnoteže napona u električnom krugu prikazujemo napon na stezaljkama baterije:

$$u_{bat} = i_{bat} R_i + U_{OC} \quad (5.7)$$

Jednadžbama (5.5), (5.6) i (5.7) mogu se izvesti različiti modeli baterije, ovisno o veličini na ulazu modela. Za simulacijsku analizu stanja napunjenosti za ulaznu veličinu koristi se napon baterije u_{bat} , za konstruiranje estimatora napunjenosti na ulaz modela postavlja se struja baterije i_{bat} . Za upravljanje energijom baterije koristi se model baziran na protoku snage

pomoću kvazi-statičkog modela baterije. Model protoka energije bazira se na odnosima iz ekvivalentnog električnog kruga prikazanog na slici 18.

$$P_{bat} = u_{bat} \cdot i_{bat} = i_{bat}^2 R_i(\text{SoC}, i_{bat}) + U_{oc}(\text{SoC}, i_{bat}) i_{bat} \quad (5.8)$$

Model baterije baziran na protoku snage dobiva se kombiniranjem i sređivanjem jednadžbe promjene stanja napunjenosti (5.6) i jednadžbe koja prikazuje snagu baterije (5.7):

$$\frac{d\text{SoC}}{dt} = \frac{\sqrt{U_{oc}^2(\text{SoC}, i_{bat}) + 4 R_i(\text{SoC}, i_{bat}) P_{bat}} - U_{oc}(\text{SoC}, i_{bat})}{2 Q_{max} R_i(\text{SoC}, i_{bat})} \quad (5.9)$$

Potrebno je da model sadrži način limitiranja pražnjenja baterije kada snaga pražnjenja zahtijeva iznos koji je veći od najveće razine pražnjenja za pojedini nivo napunjenosti baterije:

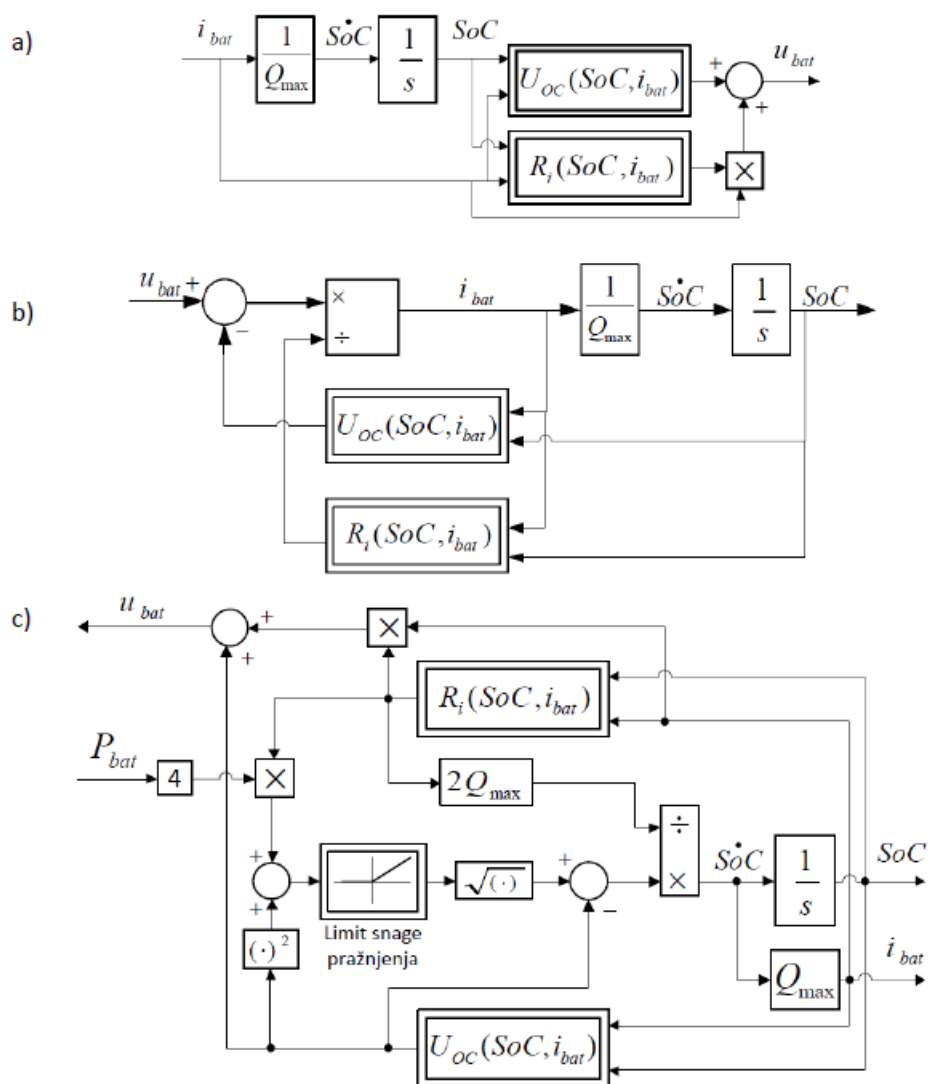
$$|P_{max,dc}| = \frac{U_{oc}^2}{4 R_{idc}} \quad (5.10)$$

Limit izlazne snage baterije ovisi o maksimalnom naponu na stezaljkama baterije, U_{max} i maksimalnoj izlaznoj struji baterije I_{max} prema slijedećem izrazu:

$$P_{max,c} < \frac{[U_{max}(\text{SoC}) - U_{oc}(\text{SoC})] U_{max}(\text{SoC})}{R_{idc}(\text{SoC})} = I_{max} U_{max} \quad (5.11)$$

Limiti struje i napona postavljaju se u DC/DC pretvaraču koji se koristi za punjenje i pražnjenje baterije.

Blokovski dijagrami baterija za sva 3 slučaja ulazne veličine prikazani su na slici 18.



Slika 18 Blokovski dijagrami baterija: a) struja na ulazu modela, b) napon na ulazu modela, c) model baziran na protoku snage

6. Fotonaponski paneli

Sunce se zbog količine dozračene energije i dugog vijeka trajanja može smatrati stalnim izvorom energije. U jednoj sekundi Sunce oslobodi više energije nego je ljudski rod ikad iskoristio što otvara mogućnost rješavanja problema energetske krize u svijetu koji ima sve više stanovnika i sve veće energetske zahtjeve. Na slici 19 je prikazana usporedba energije predane zemlji sunčevim zračenjem i godišnjom potrošnjom energije u svijetu, te zalihe fosilnih i nuklearnih goriva. Procijenjeno je da je količina energije predane od Sunca Zemlji 50 puta veća od zbroja svih zaliha fosilnih i nuklearnih goriva.



Slika 19 Godišnje sunčevo zračenje na površini Zemlje u usporedbi sa zalihama fosilnih nuklearnih goriva te godišnjom potrošnjom energije u svijetu

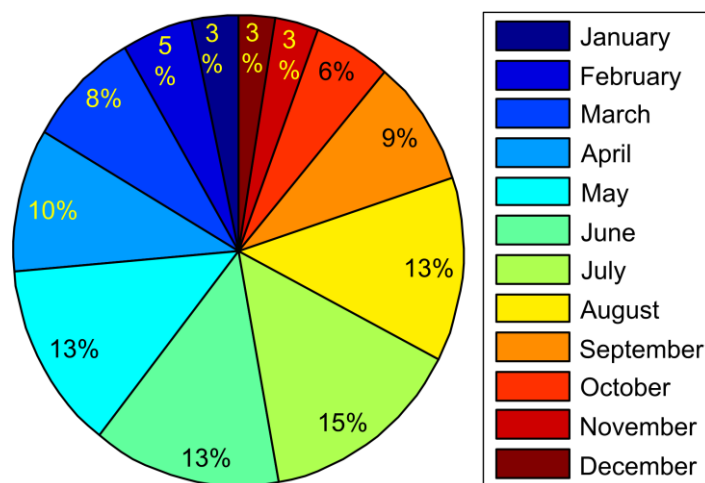
Snaga sunčevog zračenja iznosi otprilike $3.8 \cdot 10^{23}$ kW odnosno $3.3 \cdot 10^{27}$ kWh/god od čega samo mali dio stigne na zemlju koja zauzima prostorni kut od samo 0.53° što znači da do zemlje dolazi samo pola milijarditog dijela emenitirane sunčeve energije što je oko $1.75 \cdot 10^{14}$ kW ili $1.53 \cdot 10^{18}$ kWh/god. Snaga predana zemlji iznosi više od 100 000 puta od snage svih elektrana na zemlji kada rade punim kapacitetom. Unutar jednog sata Sunce preda energiju dovoljnu za potrebe 6.5 milijardi ljudi uz to što se oko 30% sunčeve energije reflektira od atmosfere natrag u svemir što znači da površina zemlje godišnje dobiva oko $1.07 \cdot 10^{18}$ kWh energije, što je nekoliko tisuća puta više nego što iznosi ukupna godišnja potrošnja energije. Energija koju upija površina Zemlje i njena atmosfera pretvara se u toplinsku energiju, od koje se 23% troši na isparavanje vode koja stvara oborine i 47% energije primi Zemlja. Zagrijavanje Zemlje prouzrokuje isparavanje vodenih površina, stvara vjetrove, morske struje i drugo. Tisućitim dijelom toplinske energije, koja dolazi od tla, koriste se biljke za nastajanje biomase, dok se ljudi koriste biljkama kao izvor energije u obliku prehrane, drva, fosilnih goriva. Mali dio sunčeve energije uzrokuje nastajanje valova, vodenih strujanja u morima i

oceanima i stvaranje vjetra što dovodi do zaključka da su svi izvori energije različite pretvorbe i oblici energije sunčeva zračenja što je ilustrirano na slici 20.

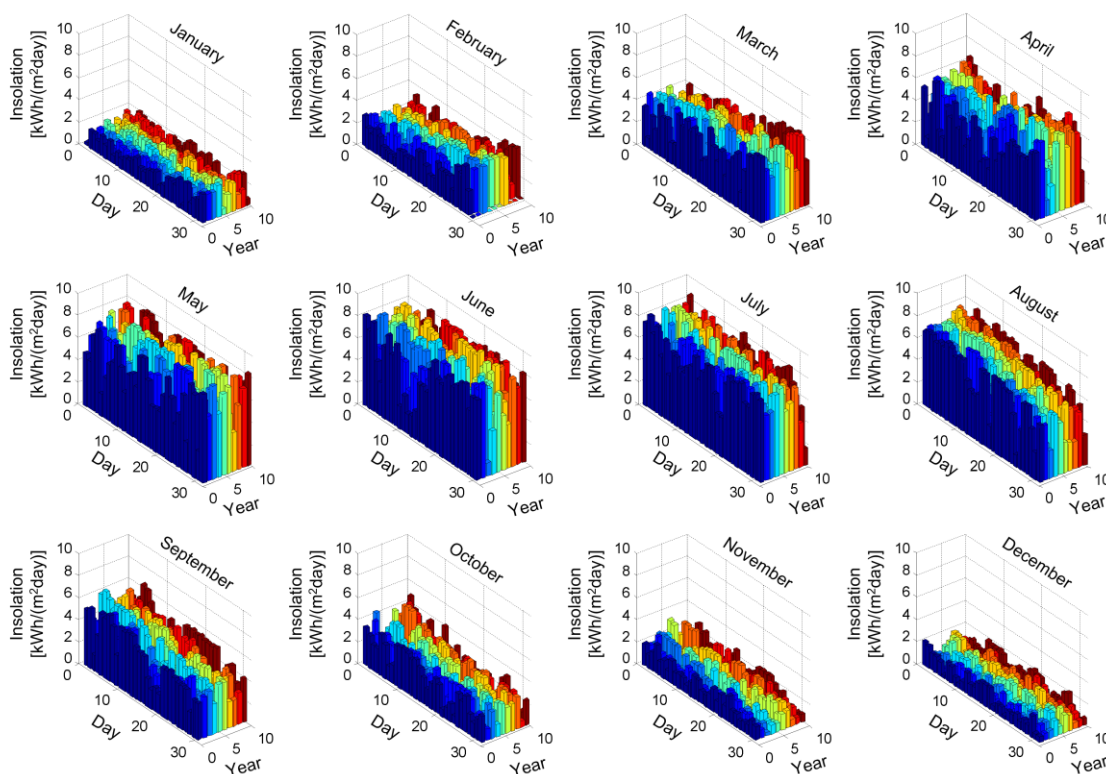


Slika 20 Oblici i pretvorbe sunčeve energije zračenja

Kako bi obnovljivi izvori energije imali veću ulogu u dobavljanju energije potrebno je kompenzirati njihove nedostatke. Nedostatak sunčevog zračenja kao izvora energije je dostupnost u samo određenim dijelovima dana i ovisnost o geografskom položaju, zaklonjenosti oblacima, konfiguraciji terena i uvjetima mikroklike kao što su temperatura, vjetar i vlažnost. Kako bi sustavi sakupljanja solarne energije bili što bolje dimenzionirani provedna su mjerenja dozračene energije u vremenskom razdoblju od 10 godina, što je predviđeni radni vijek ključnih elemenata solarnih sustava. Za dimenzioniranje sustava potrebno je poznavati raspodjelu dozračene energije tokom godine kako bi se sustav mogao dimenzionirati u skladu s potrošnjom. Prosječna raspodjela dozračene energije po mjesecima i danima prikazane su na slici 21 i 22.



Slika 21 Prikaz raspodjele ukupne dozračene energije u vremenskom periodu od 10 godina



Slika 22 Prosječna dnevna dozračena energija po mjesecima u vremenskom periodu od 10 godina

Kako bi se smanjio utjecaj čovjeka na okoliš traže se alternativni izvori energije, kao što je sunčeva energija zračenja, kinetička energija vjetra i vode, geotermalna energija, kemijska energija biomase i otpada. Alternativni izvori energije trebaju biti u skladu sa zaštitom okoliša i održivim razvojem.

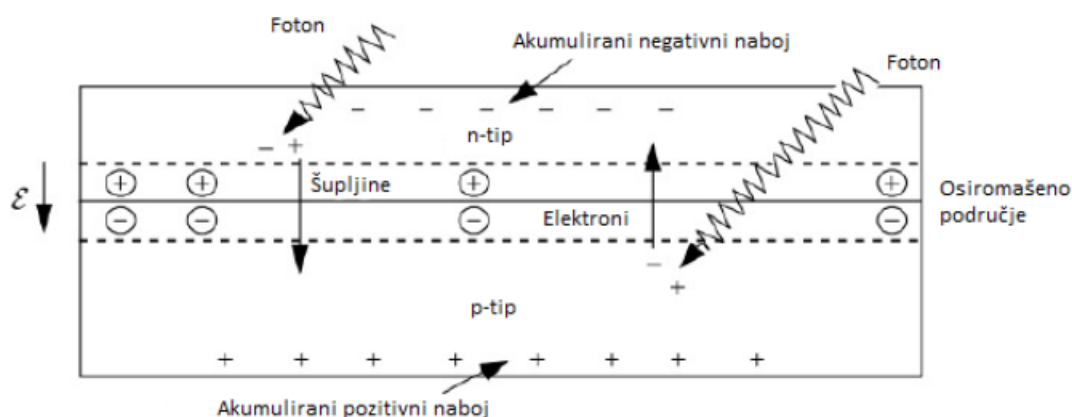
Teoretski potencijal sunčeve energije zračenja puno je veći od drugih obnovljivih izvora energije. Potencijal sunčeve energije zračenja koji se iz okoliša predaje zgradi nekoliko je puta veći od energetske potrebe te zgrade zato već postoje uređaji i oprema za pretvorbu energije zračenja u električnu ili toplinsku energiju.

6.1. Fotonaponske ćelije

Fotonaponske ćelije su poluvodički elementi koji uz pomoć svojstva fotonaponskog efekta pretvaraju sunčevo zračenje u električnu energiju. Fotonaponski efekt otkriven je 1839. od strane Edmonda Becquerela. Opisao ga je kao proizvodnju električne struje prilikom uranjanja dvije ploče platine ili zlata u kiselu, neutralnu i lužnatu otopinu te se izlažu na nejednolik način sunčevom zračenju. Prva poluvodička solarna ćelija izrađena je 1941. godine s djelotvornošću pretvorbe manjom od 1%. Zbog visoke cijene proizvodnje solarnih ćelija prvu komercijalnu primjenu nalaze u istraživačkim satelitima gdje je cijena solarnih ploča prihvatljiva u odnosu na druge troškove. I danas je cijena fotonaponskih sustava visoka u

odnosu na druge izvore energije pa se koristi samo u određenim područjima, kao na primjer u područjima gdje nema električne mreže, ali se procjenjuje da će u bliskoj budućnosti fotonaponska tehnologija dominirati u opskrbi električnom energijom zbog opadanja zaliha konvencijalnih goriva. U posljednje vrijeme dolazi do porasta u proizvodnji solarnih ćelija i modula više od 60%, a kapaciteti pojedinih modernijih pogona prelaze 50MW.

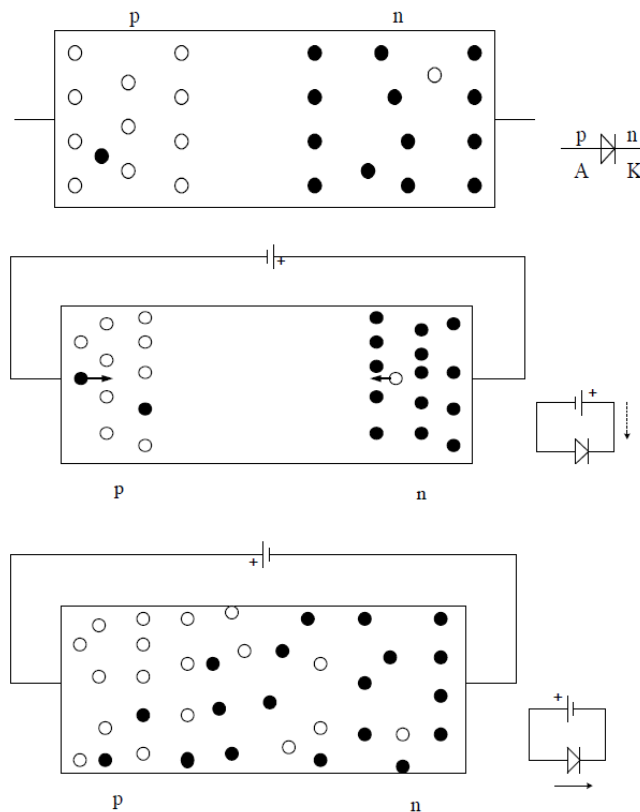
Fotonaponske ćelije su zapravo PN-spojevi, spojevi jednaki poluvodičkim diodama i izrađuju se od silicija, najzastupljenijeg poluvodičkog elementa. Sastoje se od pozitivnog i negativnog sloja, a razlika potencijala između ta dva sloja ovisi o intenzitetu solarnog zračenja. Prikaz p-n spoja fotonaponske ćelije prikazan je na slici 23.



Slika 23 Osnovni prikaz p-n spoja fotonaponske ćelije

6.1.1. Poluvodička dioda

PN-spoj nastaje dodavanjem trovalentne primjese jednom dijelu poluvodičkog materijala, trovalentna primjesa služi kao akceptorska primjesa, tj. prihvaća elektrone i naziva se p-tip poluvodiča. Drugom dijelu se dodaje peterovalentna primjesa, odnosno donorska primjesa koja se naziva n-tip poluvodiča. Na granici između ta dva spoja, kao posljedica gradijenta koncentracije, nastaje difuzija elektrona iz n-područja prema p-području i šupljina iz p-područja prema n-području. Bitno svojstvo PN-spoja je ispravljačko djelovanje, spoj lakše provodi struju kada je p-područje pozitivno nabijeno, a n-područje negativno. Tada je dioda spojena propusno, a u suprotnom slučaju dioda se spojena zaporno i ne provodi struju osim ako se ne narine previsoki napon koji uništi diodu. Dioda i njezin propusni i zaporni spoj prikazani su na slici 24.



Slika 24 Dioda - zaporni spoj i propusni spoj

Veza između vanjskog napona U i jakosti struje I_d kroz PN-spoj naziva se karakteristika diode i opisana je jednačbom:

$$I_d = I_z (e^{eU/kT} - 1) \quad (6.1)$$

Gdje je:

I_d - struja diode, [A]

I_z - struja zasićenja, [A]

e - elementarni naboj, $(1.602176462 \cdot 10^{-19} \text{ C})$

U - napon, [V]

k - Boltzmannova konstanta, $(1.3806 \cdot 10^{-23} \text{ J/K})$

T - termodinamička temperatura, K

6.1.2. Izravna pretvorba sunčeva zračenja u električnu energiju

Kada solarna ćelija apsorbira sunčevo zračenje, fotonaponskim efektom dolazi do pojave elektromotorne sile, odnosno dolazi do pojave razlike potencijala na krajevima ćelije i solarna

ćelija postaje izvorom električne energije. Kod emisije i apsorpcije sunčevog zračenja ono se može promatrati kao snop elementarnih čestica poznatijih kao fotoni. Tako je za proračun struje solarnih ćelija dobivene zračenjem potrebno poznavati tok fotona koji padaju na površinu ćelije. Svaki foton nosi određenu količinu energije koja se opisuje Planckovom konstantom koja opisuje koliku ukupnu energiju sadrži foton u periodu od jedne sekunde. Elektromagnetska zračenja razlikuju se jedino po frekvenciji. Svjetlost nastaje kada se električni naboji kreću u elektromagnetskom polju i atom odašilje svjetlost kada je jedan od njegovih elektrona aktiviran vanjskom energijom. Svjetlost manje energije ima manju frekvenciju dok ona s više energije ima veću frekvenciju. Svjetlost se opisuje kao snop fotona koji su čestice bez naboja i mase koji se gibaju brzinom svjetlosti c_0 . Enegija fotona prikazana je Enisteinovom relacijom:

$$E = h\nu = h \frac{c_0}{\lambda} \quad (6.2)$$

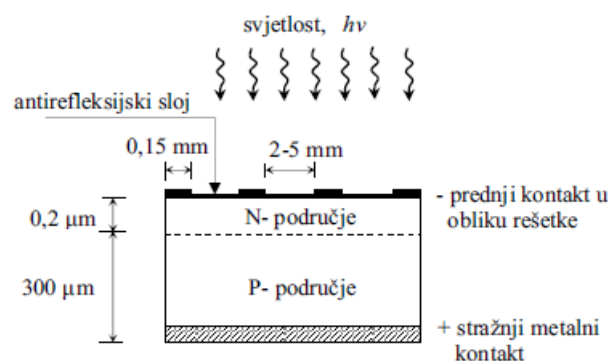
Gdje je:

h - Planckova konstanta, ($6.625 \cdot 10^{-34}$ Js)

ν – frekvencija promatranog elektromagnetskog zračenja, (Hz)

c_0 – brzina svjetlosti, ($3 \cdot 10^8$)

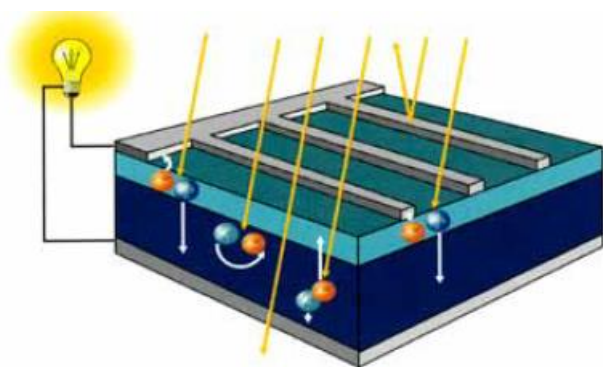
λ - valna duljina, (μm)



Slika 25 Silicijeva solarna ćelija

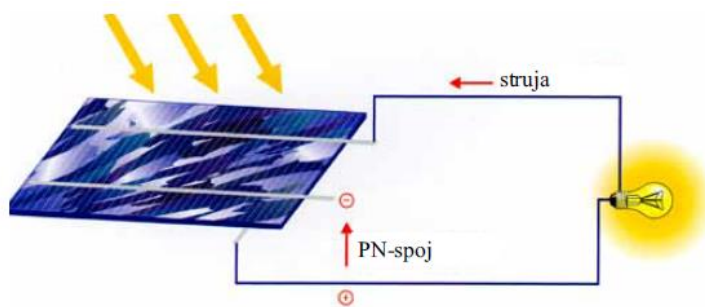
U silicijevoj solarnoj ćeliji, prikazanoj na slici 25, na površini pločice P-tipa dodaje se primjesa fosfora tako da na površini nastaje n-tip poluvodiča. Da bi se naboj nastao apsorpcijom fotona iz sunčevog zračenja na prednjoj površini ćelije nalazi se metalna rešetka koja pokriva manje od 5% površine tako da ne umanjuje bitno površinu apsorpcije. Stražnja

strana ćelije prekrivena je metalnim kontaktom. Efikasnost ćelije se povećava prozirnim proturefleksnim slojem koji umanjuje odbijanje sunčevih zraka. Osvjetljavanjem solarne ćelije na njezinim krajevima se javlja elektromotorna sila i tad se ćelija ponaša kao poluvodička dioda i ispravljački uređaj koji provodi struju u samo jednom smjeru. Električna struja se javlja kad apsorbirani fotoni proizvode parove elektrona i šupljina i smanjuje se osiromašeno područje pa se solarna ćelija ponaša kao poluvodička dioda u stanju vođenja. U tom slučaju elektroni se gibaju prema n-strani a šupljine prema P-strani. Ovo je prikazano na slici 26.



Slika 26 Nastanak parova elektrona i šupljina u solarnoj ćeliji

Osvjetljivanjem kontakta na P-području postaje pozitivan, a na N-području postaje negativan i spajanjem trošila na kontakte ćelije javlja se protok električne struje ilustriran na slici 27.



Slika 27 Solarna ćelija kao izvor električne energije

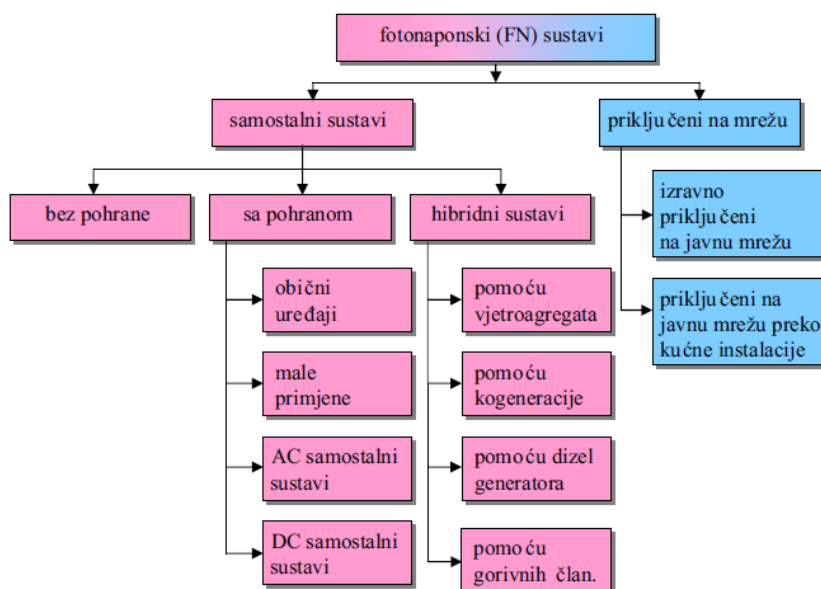
U tablici su prikazani osnovni parametri solarnih ćelija za ćelije izrađene od različitih materijala. Prikazani parametri su napon otvorenog kruga U_{ok} , gustoća struje kratkog spoja J_{ks} i stupanj djelovanja ćelije η .

Vrsta ćelije	U_{ok} , V	J_{kz} , mA/cm ²	η
monokristalna-Si ćelija	0,65	30	0,17
polikristalna-Si ćelija	0,60	26	0,15
amorfna-Si ćelija	0,85	15	0,09
CdS / Cu ₂ S	0,5	20	0,10
CdS / CdTe	0,7	15	0,12
GaAlAs / GaAs	1	30	0,24
GaAs	1	20	0,27

Tablica 1 Parametri solarnih ćelija

6.2. Solarni fotonaponski sustavi

Osnovna podjela solarnih fotonaponskih sustava je na dvije osnovne skupine: fotonaponski sustavi koji nisu spojeni na mrežu, često nazivani samostalni solarni sustavi, i fotonaponski sustavi priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu. Njihova podjela prikazana je na slici 28.



Slika 28 Podjela fotonaponskih sustava

6.2.1. Samostalni fotonaponski sustavi

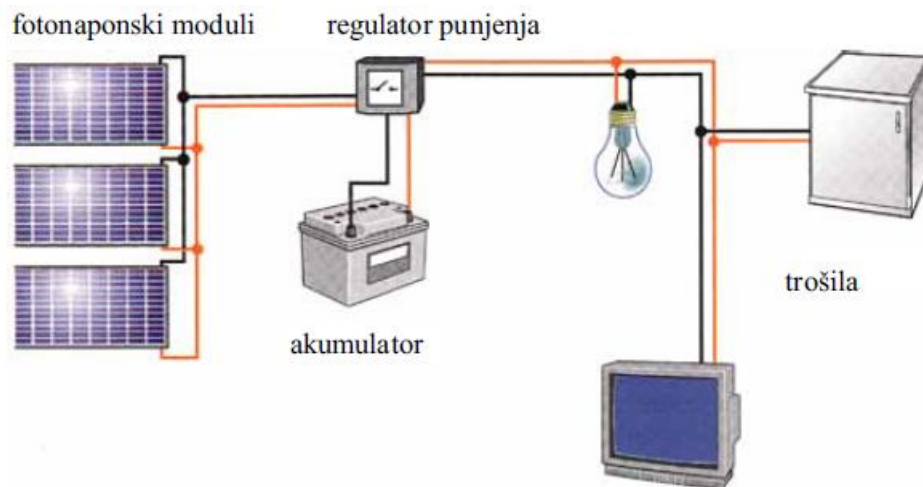
Fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na mrežu mogu biti sa ili bez pohrane energije, o čemu će ovisiti vrsta primjene i način potrošnje energije. Također postoje i hibridni sustavi koji su kombinacija solarnih panela i vjetroagregata, dizelskih generatora ili gorivnih članaka.

Temeljne komponente samostalnog fotonaponskog sustava:

1. Fotonaponsku moduli – spojeni paralelno ili serijski-paralelno
2. Regulator punjenja
3. Akumulator (baterija) za pohranu energije
4. Trošilo

5. Izmjenjivač – ovisno o trošilima

Osnovni sustav je prikazan na slici 29.



Slika 29 Samostalni fotonaponski sustav

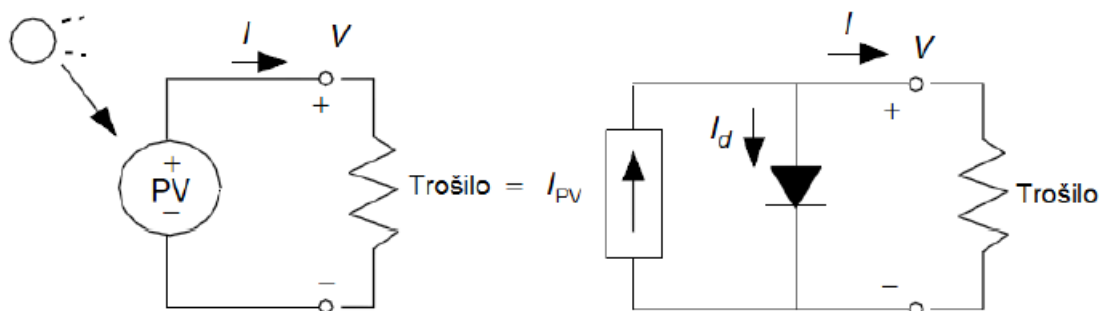
U prikazanom samostalnom fotonaponskom sustavu javljaju se dva osnovna procesa:

- Pretvorba sunčevog zračenja u električnu energiju
- Pretvorba električne energije u kemijsku i kemijske u električnu energiju

Fotonaponska pretvorba svjetlosne energije u električnu energiju odvija se u solarnoj ćeliji, dok se u akumulatoru odvija povratni elektrokemijski proces pretvorbe električne energije u kemijsku i obratno.

6.3. Matematički model fotonaponskih ćelija

Jednostavni električni krug fotonaponske ćelije prikazuje se od realne poluvodičke diode spojene paralelno sa idealnim strujnim izvorom koji nadomješta sunčevo zračenje. Ekvivalentni jednostavni strujni krug prikazan je na slici 30.



Slika 30 Ekvivalentni električni strujni krug fotonaponske ćelije

Struja koja teče kroz trošilo evivalentnog električnog kruga fotonaponske ćelije je:

$$I = I_{PV} - I_d \quad (6.3)$$

Gdje je:

I - struja koja teče kroz trošilo priključeno na fotonaponsku ćeliju

I_{PV} - Struja fotonaponskog izvora

I_d - Struja koja teče kroz diodu fotonaponskog električnog kruga

Struja diode opisuje se slijedećim izrazom:

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV_d}{akT_c}} - 1 \right) \quad (6.4)$$

Gdje je :

I_0 - reverzna struja zasićenja, (A)

V_d - napona diode, (V)

a - faktor idealnosti diode, (silicij=1.35)

k - Boltzmannova konstanta, ($1.3806 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$)

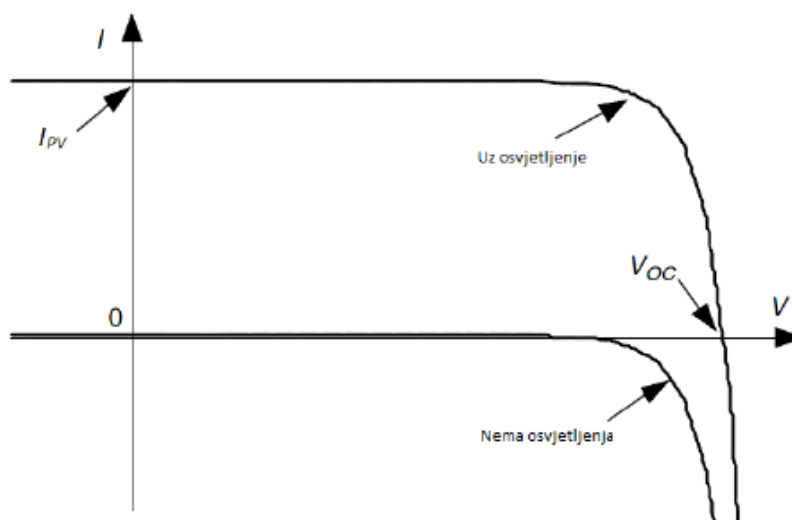
q - elementarni naboj elektrona, ($1.60217 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

T_c - temperatura ćelije, (K)

Uvrštavanjem jednadžbe (6.4) u jednadžbu (6.3) dobije se:

$$I = I_{PV} - I_0 \left(e^{\frac{qV_d}{akT_c}} - 1 \right) \quad (6.5)$$

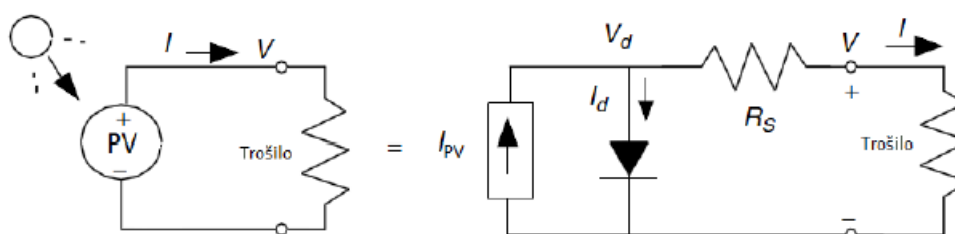
Izraz (6.5) opisuje strujno naponsku karakteristiku fotonaponske ćelije. U slučaju bez osvjetljenja krivulja ima oblik zrcaljenje strujno-naponske karakteristike poluvodičke diode. U slučaju prisutstva osvjetljenja strujno-naponska karakteristika je I-U karakteristika bez osvjetljenja uvećana za I_{PV} . Strujno naponska karakteristika fotonaponske ćelije je prikazana na slici 31.



Slika 31 I-U karakteristika fotonaponske ćelije sa i bez osvjtljenja

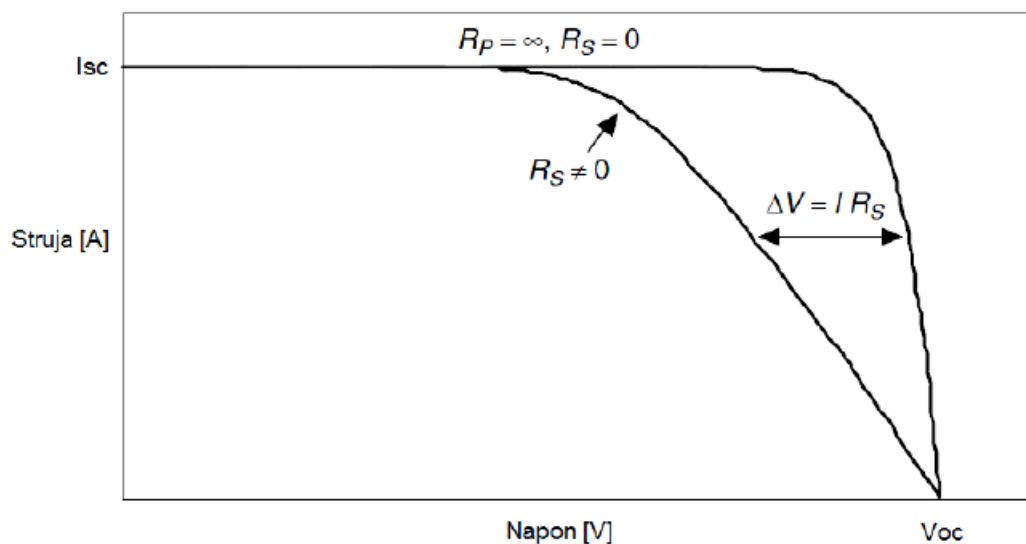
6.4. Parazitski otpor FN ćelije

U fotonaponskoj ćeliji se javljaju pojave koje utječu na karakteristiku fotonaponske ćelije. Jedno od najvećih ograničenja fotonaponskih panela predstavljaju gubici koji se javljaju zbog otpora poluvodičkih materijala u p-n spoju, otporu metalne rešetke kao i otpor metalnih kontakata. Ta vrsta gubitaka se naziva serijskim parazitskim otporom. Električna shema fotonaponskog panela s uključenim parazitskim otporima prikazana je na slici 32.



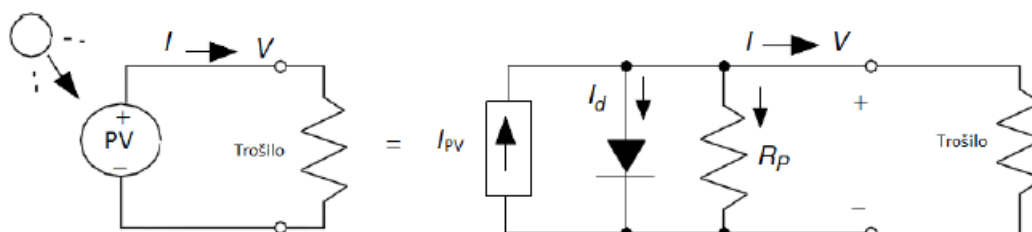
Slika 32 Ekvivalentna električna shema fotonaponskog panela sa serijskim otporom

Utjecaj serijskog parazitskog otpora na I-U karakteristiku fotonaponske ćelije prikazan je na slici 33 na kojoj se vidi pad napona uzrokovan serijskim parazitskim otporom. Ujedno se može uočiti da nema parazitskog pada napona u otvorenom krugu.



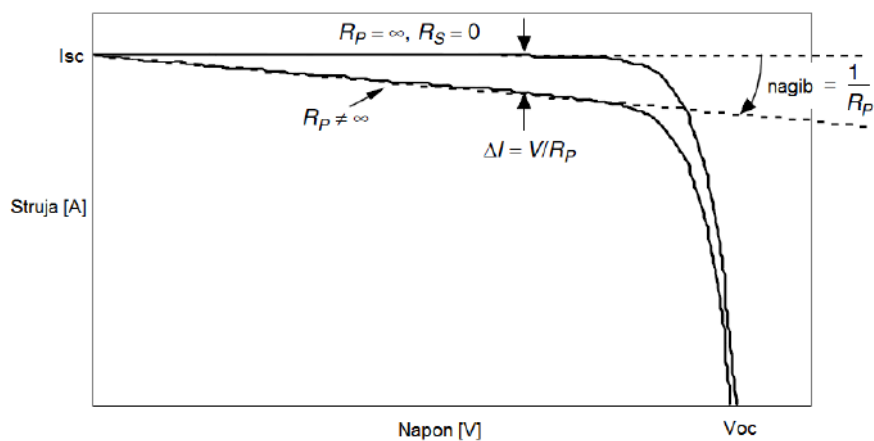
Slika 33 Utjecaj serijskog otpora na I-U karakteristiku ćelije

Gubici izazvani zbog neidealnosti i nečistoće p-n spoja, koje izazivaju smanjenje spoja blizu krajeva ćelije, nazivaju se paralelni parazitski otpori i označuju se s R_p . Ekvivalentna električna shema prikaza na je na slici 34.



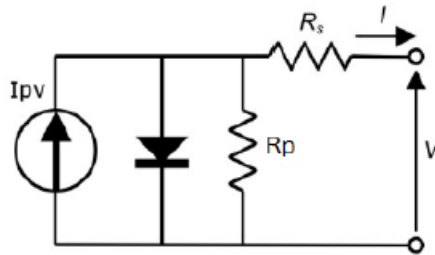
Slika 34 Ekvivalentna električna shema FN ćelije s paralelnim parazitskim otporom

Utjecaj paralelnog parazitskog otpora na I-U karakteristiku prikazanan je na slici 35.



Slika 35 Utjecaj paralelnog parazitskog otpora na I-U karakteristiku FN ćelije

Ekvivalentni električni krug s uključenim serijskim i paralelnim parazitskim otporima prikazan je na slici 36.



Slika 36 Ekvivalentna električna shema s uključenim serijskim i paralelnim parazitskim otporom

Napon na diodi opisuje se sljedećim izrazom:

$$V_d = V + I \cdot R_s \quad (6.6)$$

Izraz se proširuje sa serijskim otporom:

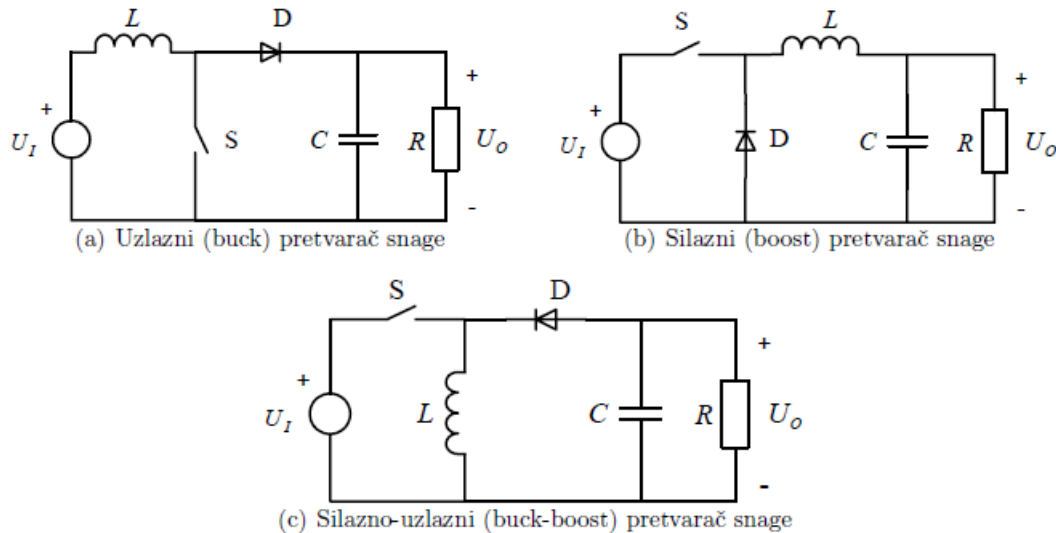
$$I = I_{pV} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{akT_c}} - 1 \right) \quad (6.7)$$

Dodavanjem paralelnog otpora dobiva se izraz:

$$I = I_{pV} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{akT_c}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (6.8)$$

7. Frekvencijski pretvarači snage

Osnovne strukture istosmjernih pretvarača su silazni („buck“), uzlazni („boost“) i silazno-uzlazni („buck-boost“) pretvarači snage. Njihovi nadomjesni modeli dani su na slici 37.

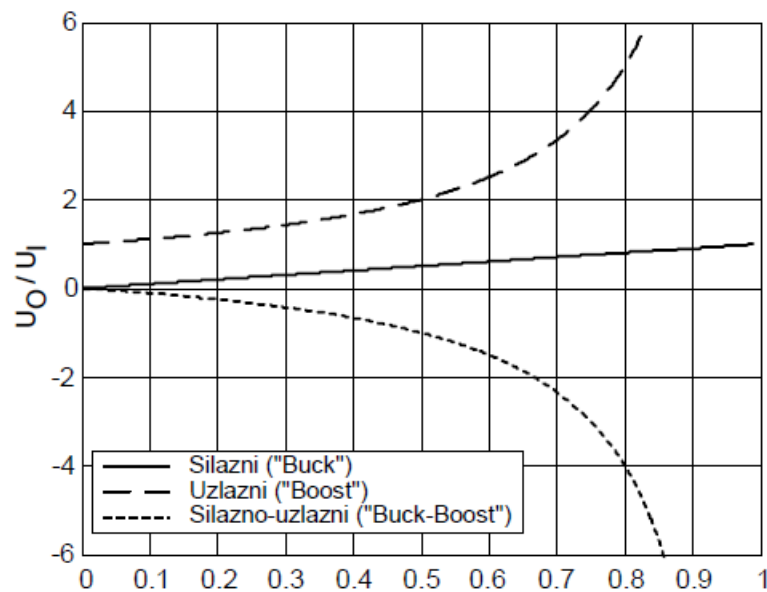


Slika 37 DC-DC pretvarači

Odnos između ulaznog napona U_i i izlaznog napona U_o određen je strukturom pretvarača i faktorom vođenja d koji prikazuje omjer ukupnog perioda sklopke i perioda u kojem sklopka vodi

$$\begin{aligned}
 d &= \frac{T_u}{T} \\
 T_u &= Td \\
 T_i &= T(1-d)
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

Gdje je T period uklopa pretvarača, T_u vremenski interval u kojem je sklopka S uključena, a T_i interval u kojem je sklopka isključena. Dinamika izlazne struje ovisi o induktivitetu i radnom otporu prigušnice i kapacitetu i radnom otporu trošila, struja se mijenja približno linearno, odnosno pada dok je sklopka isključena i raste dok je sklopka uključena. Prijenosne karakteristike dane su na slici 38.



Slika 38 Prijenosne karakteristike DC-DC pretvarača

Uzlazni i silazno-uzlazni pretvarači imaju nelinearnu prijenosnu karakteristiku prikazanu u tablici 2.

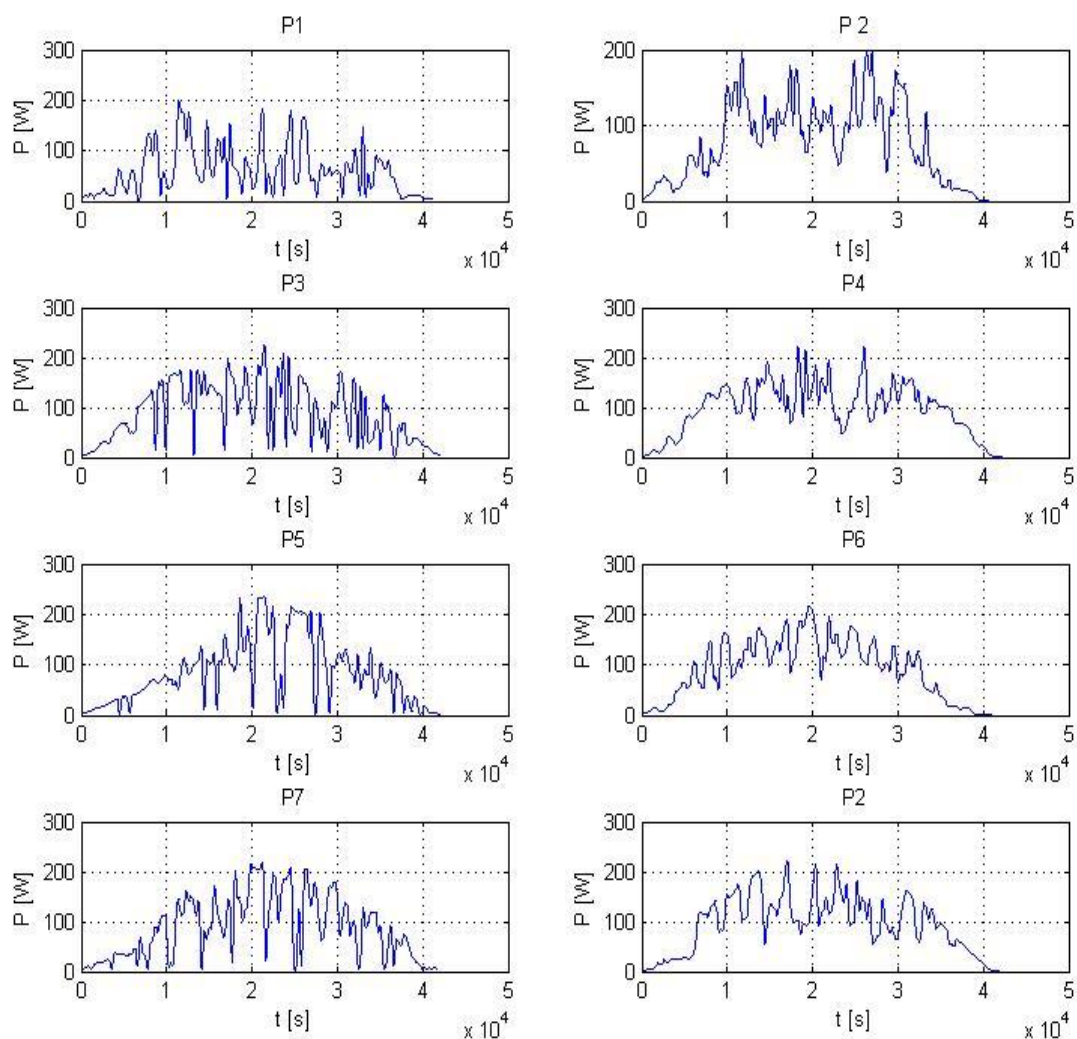
Pretvarač	U_o / U_i
Silazni	d
Uzlazni	$1 / (1 - d)$
Silazno-uzlazni	$-d / (1 - d)$

Tablica 2 Prijenosna karakteristika DC-DC pretvarača

Izlazni napon pretvarača raste s porastom faktora vođenja u sve tri strukture DC/DC pretvarača s tim da je izlazni napon silaznog pretvarača uvijek manji od ulaznog napona, izlazni napon uzlaznog pretvarača uvijek veći od ulaznog napona i suprotnog polariteta za silazno-uzlazni pretvarač pa je moguće ostvariti izlazne napone veće ili manje od ulaznog napona.

8. Dimenzioniranje baterije

Dimenzioniranje baterije se provodi za profil izlazne snage fotonaponskog panela koji ima najmanju ukupnu energiju kako bi dimenzioniranje bilo provedeno za najnepovoljniji slučaj. Zadani profili prikazuju iznose snage u periodu od 12 sati. Profili izlazne snage fotonaponske ćelije prikazani su na slici 39.



Slika 39 Profili snaga fotonaponske ćelije

Određivanje najnepovoljnijeg profila izlazne snage određuje se uspoređivanjem ukupne energije koju je predala fotonaponska ćelija. Određivanje ukupne energije se provodi se numeričkim integriranjem zadanih podataka u periodu od 12 sati.

$$W = \int_0^T P(t) dt \quad (8.1)$$

Profil opterećenja	Energija [Wh]
W1	684.76
W2	887.58
W3	1038
W4	1144.5
W5	971
W6	1045.9
W7	1004.1
W8	1105.3

Tablica 3 Energija profila izlazne snage fotonaponskih panela

Simulacija se izvodi koristeći prvi profil opterećenja koji predaje najmanje energije bateriji i četvrti profil koji ima najviše predane energije kako bi se ispitale krajnosti prilikom predaje energije fotonaponske ćelije bateriji. Profilima se dodaje period od 12 sati bez predaje energije tako da se simulacija izvršava u periodu od 24 sata. Korištena je olovna baterija regulirana ventilom, u literaturi zvana VRLA baterija. Dimenzioniranje se izvodi paralelnim spajanjem baterija što rezultira konstantnim naponom i povećanjem ukupnog kapaciteta. Osnovna korištena baterija ima karakteristike:

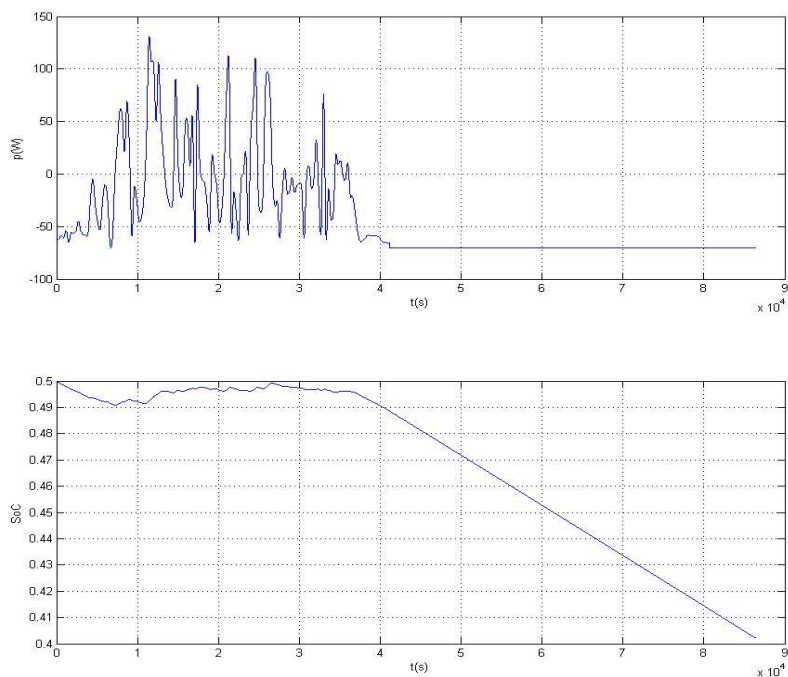
- Maksimalni napon baterije: $U_{bat_max} = 13.1 \text{ V}$
- Napon otvorenog kruga: $U_{oc} = 11.1 \text{ V}$
- Unutarnji otpor baterije: $R_i = 0.064 \Omega$
- Ukupni kapacitet baterije: $Q_{bat_max} = 50 \text{ Ah}$

Ukupni kapacitet baterije računa se množenjem kapaciteta osnovne baterije s brojem modula koji su paralelno spojeni:

$$Q = n \cdot Q_{bat} \quad (8.2)$$

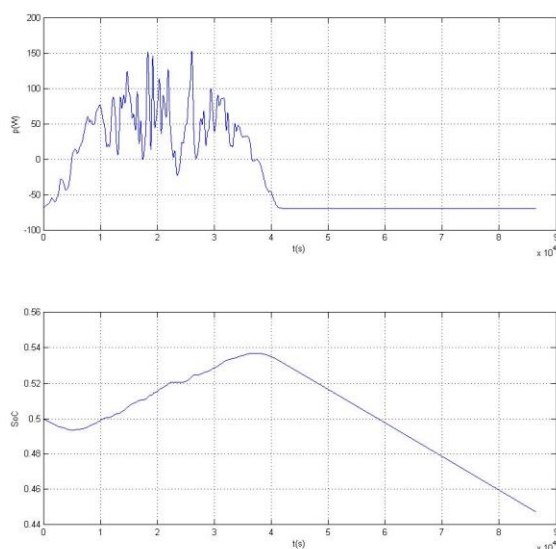
$$Q = 17 \cdot 50 = 700 \text{ Ah} \quad (8.3)$$

Sustav je opterećen konstantim trošilom, snage $P_t = 70W$. Na slici 40 je prikazan pad kapaciteta baterije za profil s najmanje predane energije uz početni postotak punjena od 50%, $SoC = 0.5$.



Slika 40 Stanje napunjenosti baterije uz najmanji profil predane energije

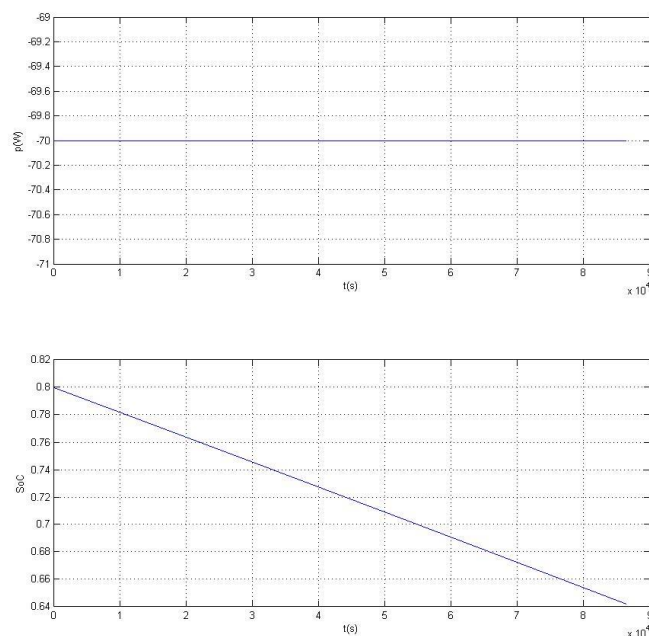
Da napunjenost baterije ne prelazi zadanih 60% provodi se simulacija za profil snage fotonaponske baterije s najvećom količinom predane energije.



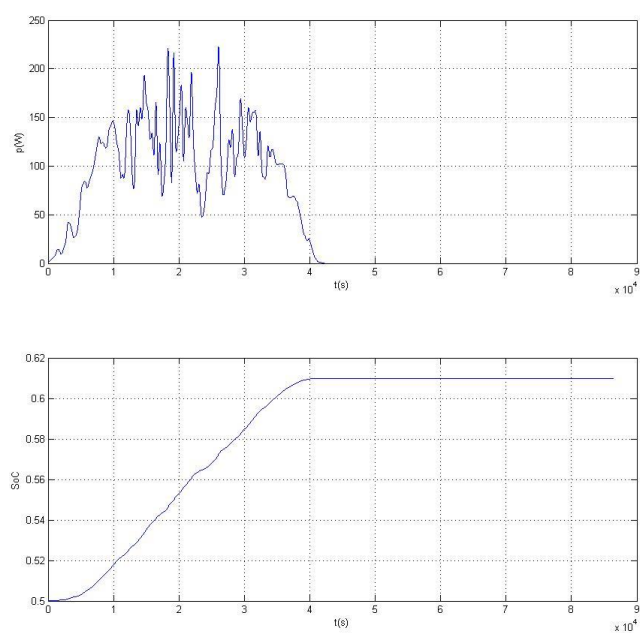
Slika 41 Stanje napunjenosti uz profil snage s najviše predane energije

Nakon provedenih simulacija dolazi se do zaključka da je sustav unutar zadanog područja rada od 40% do 60% napunjenosti za 17 paralelno spojenih baterija.

Dodatni zahtjevi, kako bi se osigurala dugotrajnost baterije, su da u slučaju ispada fotonaponskih ćelija stanje napunjenosti baterije unutar 24 sata ne padne ispod 20% i u slučaju ispada potrošača stanje napunjenosti baterije ne prelazi 80%. Ta dva slučaja su prikazana na slici 42 i slici 43.



Slika 42 Ispad fotonaponskih ćelija



Slika 43 Stanje napunjenosti baterije u slučaju ispada trošila

9. Regulacije DC sabirnice

Regulacija se vrši na pojednostavljenom vremenski-kontinuiranom modelu DC sabirnice. PI regulator napona DC sabirnice zasnovan je na linearnom modelu reference struje baterije. Regulator napona baterije je izveden u kaskadnoj strukturi koja sadrži regulacijski krug struje kojem je referentna vrijednost upravljana regulacijskim krugom napona. Kaskadna struktura regulacije izvodi se sljedno što što znači da se regulacijski krug konstruira od unutarnjeg regulacijskog kruga struje do vanjskog regulacijskog kruga koji regulira napon. U kaskadnoj strukturi potiskivanje poremećanja se vrši na lokalnoj razini, tj. svaki regulacijski krug potiskuje poremećanje za svoju reguliranu varijablu. Varijable su efektivno ograničene zasićenjem prethodne varijable iz koje proizlazi referentna vrijednost regulacijske petlje. Regulator je podešen prema kriteriju optimuma dvostrukog odnosa.

9.1. Optimum dvostrukog odnosa

Kriterij optimuma dvostrukog odnosa je analitička metoda za određivanje parametara regulatora kontinuiranog sustava. Analitički izrazi za parametre regulatora izvode se izjednačavanjem koeficijenta karakterističnog polinoma zatvorene petlje reguliranog sustava n -tog reda

$$A(s) = a_n s^n + \dots + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1 \quad (9.1)$$

i karakterističnog polinoma optimuma dvostrukog odnosa

$$A(s) = D_n D_{n-1}^2 \dots D_2^{n-1} T_e^n s^n + \dots + D_3 D_2^2 T_e^3 s^3 + D_2 T_e^2 s^2 + T_e s + 1 \quad (9.2)$$

Gdje su D_i karakteristični bezdimenzijski odnosi, a T_e je ekvivalentna vremenska konstanta zatvorene petlje. Glavne karakteristike optimuma dvostrukog odnosa su:

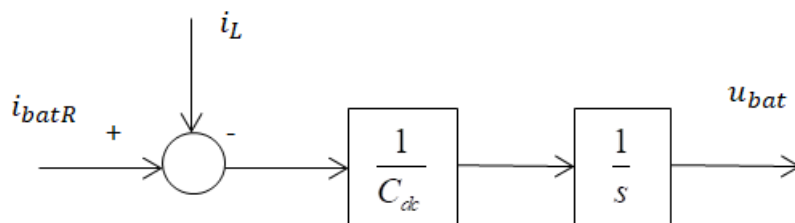
- Za regulator punog reda, sve karakteristične odnose moguće je namjestiti na optimalnu vrijednost od 0.5 što zatvorenoj petlji daje kvazi aperiodski odziv na skokovitu promjenu s prebačajem od otprilike 6% i vremenom stabilizacije odziva od $1.8T_e$ za bilo koji sustav n -tog reda
- Za regulatore nižeg reda, s brojem parametara jednakim r , dominantni karakteristični odnosi se postavljaju na optimalnu vrijednost 0.5 osim ako je odziv previše oscilatoran
- Prigušenje odziva najviše ovisi o dominantnom karakterističnom odnosu D_2 . Smanjenjem tog odnosa na 0.35 odziv na skokovitu promjenu je najbrži i aperiodski bez prebačaja

9.2. DC sabirnica

DC sabirnica služi za povezivanje istosmjernih trošila i izvora energije kao što su fotonaponski paneli, mali vjetroagregati s ispravljačem na izlazu i drugi. DC sabirnica prihvaća struju baterije, fotonaponskog modula i struju tereta i rezultirajuća struja nabija ili izbiju kondenzator C_{dc} na sabirnici kapaciteta. Proces punjenja ili pražnjenja kondenzatora opisuje se dinamičkim modelom prvog reda:

$$u_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int i_{dc} dt = -\frac{1}{C_{dc}} \int (i_{bat} + i_L) dt \quad (9.3)$$

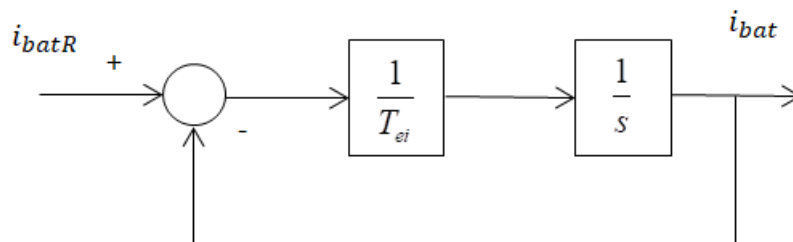
Gdje je u_{dc} napon DC veze, i_{bat} struja baterije i i_L ukupni teret koji uključuje trošilo i fotonaponske module. Model DC sabirnice prikazan je na slici 44.



Slika 44 Model DC veze

9.3. Regulacija podređenog kruga struje baterije

Podređeni regulacijski krug struje opremljen je odgovarajućim regulatorom struje, te se za potrebe projektiranja sustava regulacije napona DC sabirnice podređeni regulacijski krug struje aproksimira P1 članom. Nadomjesni model regulacijskog kruga struje baterije je prikazan na slici 45.

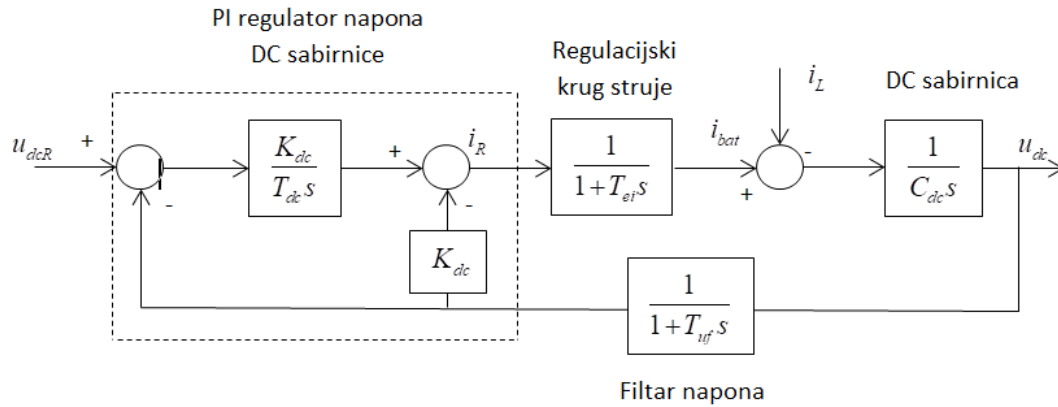


Slika 45 Nadomjesni krug struje

U podređenom regulacijskom krugu struje referentna struja i_{batR} zadana je nadređenim regulacijskim krugom napona DC sabirnice. Konstanta T_{ei} je parazitska vremenska konstanta i utječe na vrijeme odziva sustava.

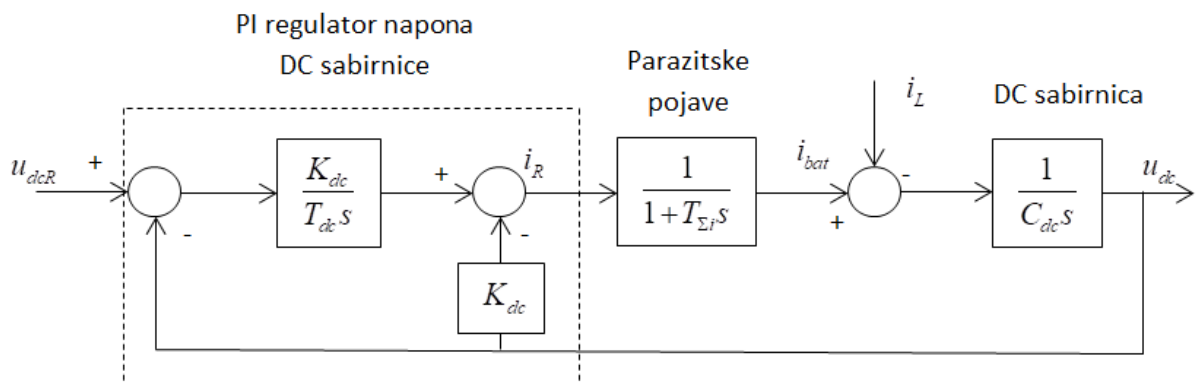
9.4. Regulacija napona

Regulacija napona je izvedena vremenski-kontinuiranim *PI* regulatorom. Linearni model regulacijskog sustava s nadređenim regulatorom napona i podređenim regulatorom struje prikazan je na slici 46.



Slika 46 Kaskadna struktura regulatora napona DC sabirnice

U modeliranju kruga regulacije napona unutranji krug regulacije struje i utjecaj filtra napona u povratnoj vezi aproksimira se vremenski-kontinuiranim P1 članom. Pojednostavljeni model DC sabirnice prikazan je na slici 47.



Slika 47 Pojednostavljeni model regulacije napona DC sabirnice

Prijenosna funkcija sustava DC sabirnice prikazuje odnos referentnog napona u_{dcR} i izlaznog napona sabirnice u_{dc} .

$$\frac{u_{dc}(s)}{u_{dcR}(s)} = \frac{1}{1 + T_{dc}s + \frac{C_{dc}T_{dc}}{K_{dc}}s^2 + \frac{C_{dc}T_{dc}T_{\Sigma i}}{K_{dc}}s^3} \quad (9.4)$$

Gdje je parazitska vremenska konstanta $T_{\Sigma i}$ jednaka zbroju vremenskih konstanti podređenog regulacijskog kruga struje T_{ei} i vremenske konstante filtra napona T_{uf} .

$$T_{\Sigma i} = T_{ei} + T_{uf} = 4 + 4 = 8ms \quad (9.5)$$

Konstanta C_{dc} opisuje kapacitivnost DC sabirnice i zadana je s vremenskom konstantom podređenog regulacijskog kruga struje i filtra napona.

T_{ei}	$4ms$
T_{uf}	$4ms$
C_{dc}	$40mF$

Tablica 4 Parametri procesa

Prijenosna funkcija zatvorenog regulacijskog kruga napona DC sabirnice uspoređuje se s karakterističnim polinomom prema kriteriju dvostrukog odnosa.

$$G(s) = \frac{1}{A(s)} = \frac{1}{D_3 D_2^2 T_e^3 s^3 + D_2 T_e^2 s^2 + T_e s + 1} \quad (9.6)$$

Prema kriteriju optimuma dvostrukog odnosa parametri sustava se postavljaju prema slijedećim izrazima. Pojačanje DC sabirnice izražava se pomoću slijedeće relacije:

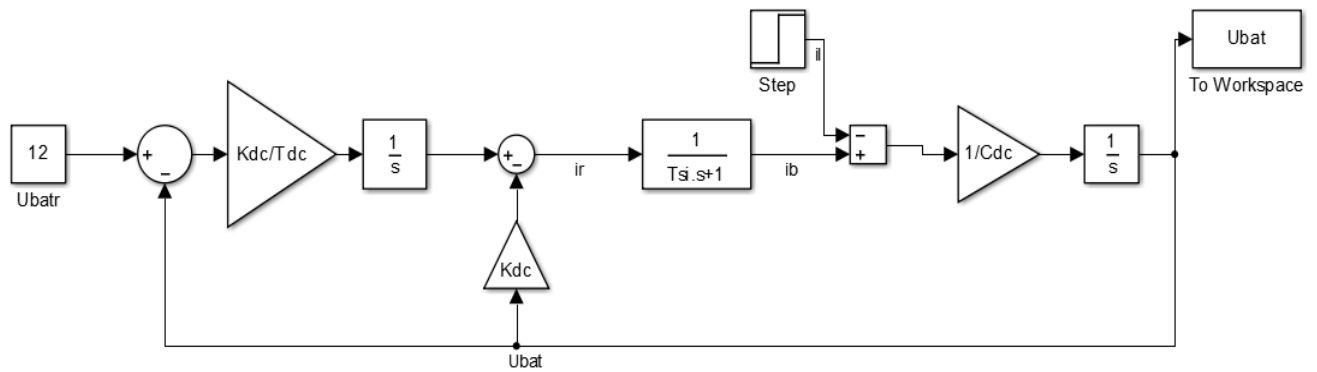
$$K_{dc} = \frac{C_{dc}}{D_2 T_e} \quad (9.7)$$

Gdje su D_2 i D_3 karakteristični odnosi sustava koji su podenešeni na optimalnu vrijednost $D_2 = 0.5$. Ekvivalentna vremenska konstanta opisuje kašnjenje sustava DC sabirnice i računa se izrazom:

$$T_e = T_{dc} = \frac{T_{\Sigma i}}{D_2 D_3} \quad (9.8)$$

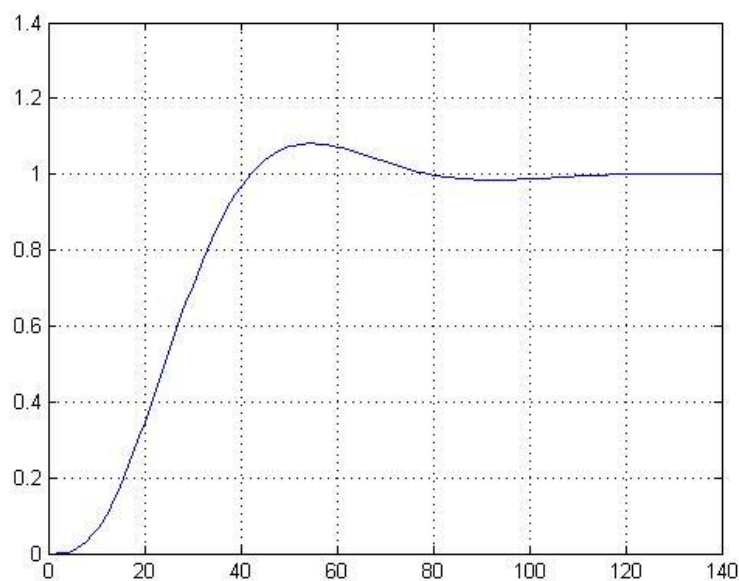
9.5. Analiza regulatora napona DC sabirnice

Regulacijski sustav napona DC sabirnice s podređenim regulacijskim krugom struje ispitan je na modelu prikazanom na slici 48.



Slika 48 Simulink model DC sabirnice

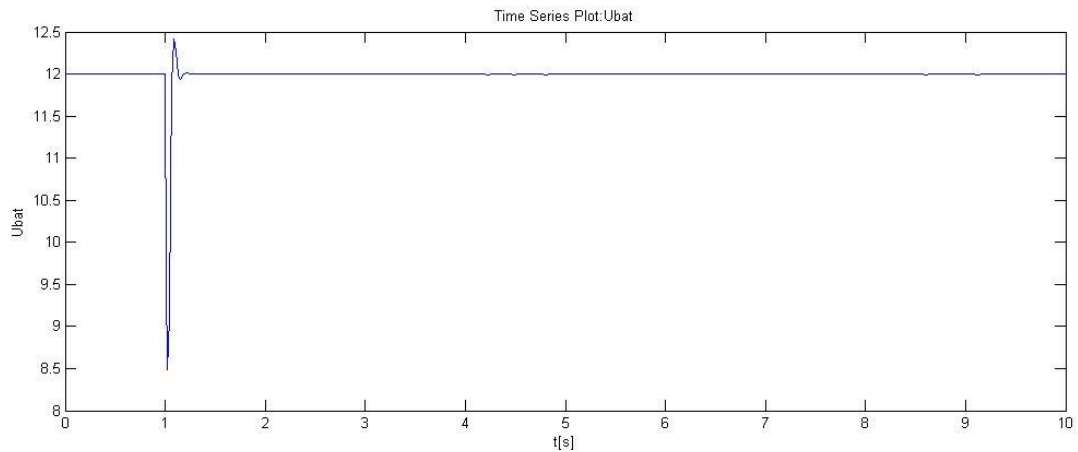
Prema Slici 49 koja prikazuje odziv prijenosne funkcije (9.6) na skokovitu pobudu vidljivo je da sustav ima kvazi aperiodski odziv s nadvišenjem od 8% i vremenom smirivanja od 118 ms što odgovara kriteriju optimuma dvostrukog odnosa.



Slika 49 Kriterij optimuma dvostrukog odnosa

U modelu DC sabirnice regulacija struje aproksimirana je P1 članom i struja tereta je prikazana kao skokovita promjena. sSimulacija je izvršena za skokovitu promjenu struje tereta od $i_L = 10A$ uz referentnu vrijednost napona $u_{batR} = 12V$.

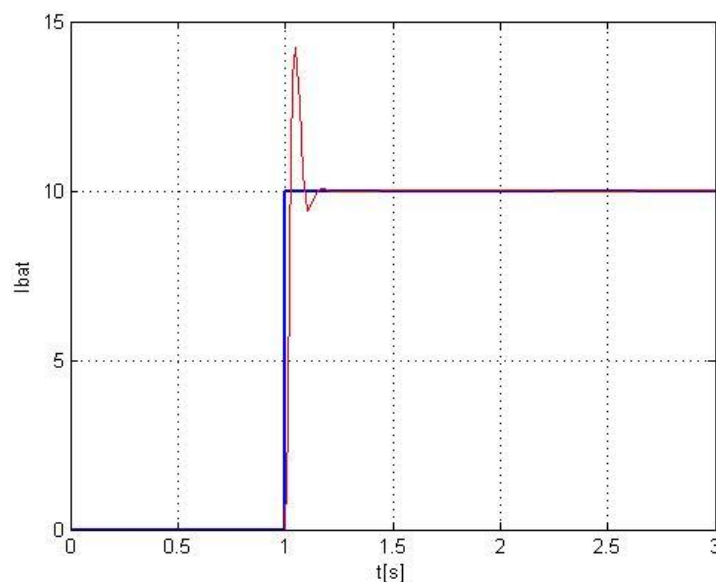
Napon baterije na izlazu DC sabirnice je na slici 50.



Slika 50 Odziv napona sabirnice

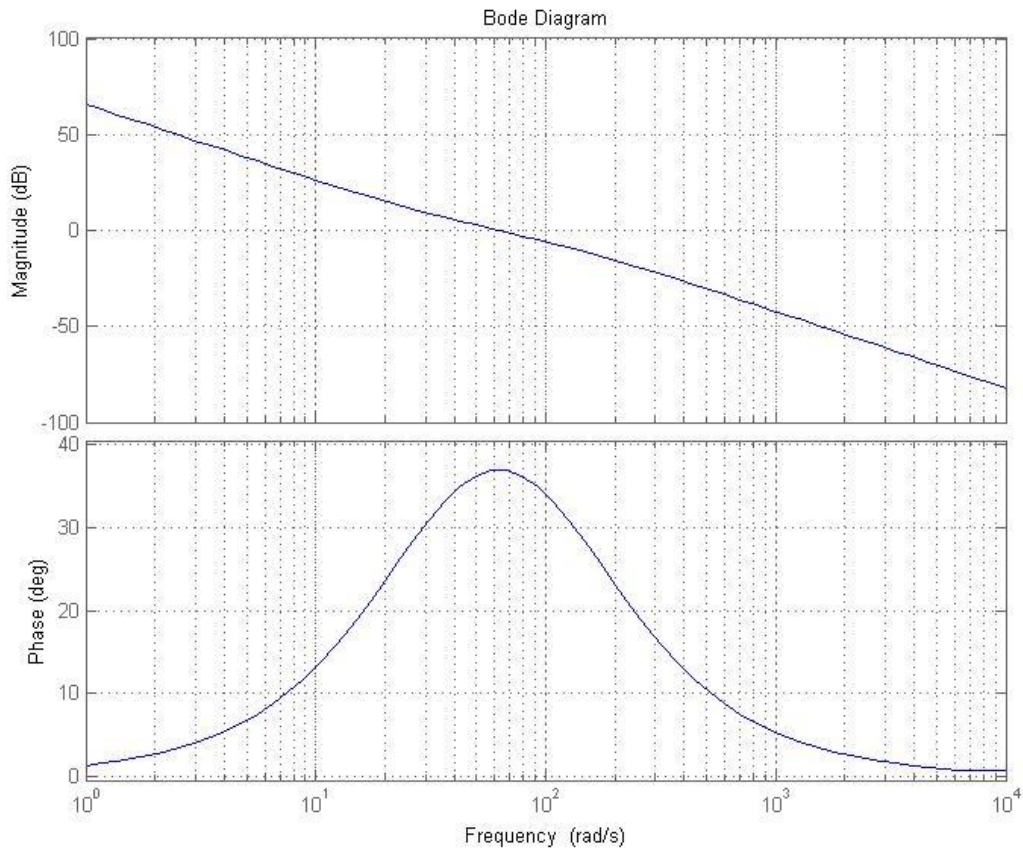
Nakon provedne simulacije u kojoj se javlja skokovita promjena tereta na iznos od $i_L = 10\text{A}$ dolazi do pada napona koji se vraća na referentnu vrijednost s prebačajem od 4% što je što odgovara kriteriju opimuma dvostrukog odnosa.

Na slici 51 je prikazan odziv struje baterije na skokovitu promjenu tereta. Brzina odziva je određena vremenskom konstantom T_{ei} , a aproksimacija podređenog kruga struje P1 članom ima utjecaj na prigušenje sustava. Vrijeme smirivanja iznosi 21ms uz maksimalno nadvišenje od 4A.



Slika 51 Odziv podređenog regulacijskog kruga struje

Uvrštavanjem optimalnih iznosa karakterističnih odnosa $D_2 = D_3 = 0.5$ u izraze (9.7) i (9.8) dobiju se konačni izrazi za parametre PI regulatora napona. Taakv način podešavanja naziva se simetrični optimum i njegova optimalnost je prikazana Bode-ovim dijagramom koji je prikazani na slici 52.



Slika 52 Bodeovi dijagrami otvorenog regulacijskog kruga podešenog prema simeričnom optimumu

Lomne frekvencije $1/T_e$ i $1/T_{\Sigma i}$ simetrično su raspoređene oko prosječne frekvencije što odgovara maksimalnom iznosu fazne rezerve.

10. Zaključak

U radu je dan pregled tehnologija elektrokemijskih baterija i fotonaponskih modula. Također je realiziran sustav upravljanja naponom baterije koja je dimenzionirana za rad unutar zadanih 40% i 60% napunjenosti baterije i 20% i 80% napunjenosti u ekstremnim slučajevima. Iz provedenih simulacija empirijski je određen broj modula olovne baterije u paralelnom spoju koji zadovoljava sve zadane parametre vezane uz stanje napunjenosti baterije. Projektiran je sustav regulacije napona DC sabirnice u kaskadnoj strukturi s podređenim regulacijskim krugom struje i nadređenim regulacijskim krugom napona kojem su ispitani odzivi za konstantno opterećenje. Parametri sustava regulacije su podešeni prema optimumu dvostrukog odnosa. Nakon provedenih simulacija napon i struja baterije se stacioniraju na zadanim vrijednostima pa se utvrđuje da je sustav regulacije logički točan.

11. Literatura

- [1.] David Linden: „Handbook of batteries, 3rd edition“
- [2.] Pavković, Danijel; Krznar, Matija; Komljenović, Ante; Hrgetić, Mario; Zorc, Davor: „Dual EKF-based State and Parameter Estimator for a LiFePO₄ Battery Cell, Journal of Power Electronics“, 17, no. 2 (2017): 398 – 410.
- [3.] Pavković, Danijel; Sedić, Almir; Guzović, Zvonimir: „Oil Drilling Rig Diesel Power-plant Fuel Efficiency Improvement Potentials through Rule-Based Generator Scheduling and Utilization of Battery Energy Storage System, Energy Conversion and Management“, 121 (2016): 194 – 211.
- [4.] Pavković, Danijel; Lobrović, Mihael; Hrgetić, Mario; Komljenović, Ante: „A Design of Cascade Control System and Adaptive Load Compensator for Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage-based Direct Current Microgrid“, Energy Conversion and Management, 114 (2016): 154 – 167.
- [5.] Pavković, Danijel; Hoić, Matija; Deur, Joško; Petrić, Joško: „Energy Storage Systems Sizing Study for a High-Altitude Wind Energy Application“, Energy 76 (2014): 91–103.
- [6.] Sedić, Almir; Pavković, Danijel; Firak, Mihajlo: „A methodology for normal distribution-based statistical characterization of long-term insolation by means of historical data, Solar Energy“, 122 (2015): 440 – 454.
- [7.] Pavković, Danijel; Komljenović, Ante; Hrgetić, Mario: “Control-Oriented Modeling and Experimental Identification of a VRLA Battery”, Proceedings of 17th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE 2013), pp. 2-9, Dubrovnik, Croatia, 2-4 October 2013.
- [8.] Pavković, Danijel; Hrgetić, Mario; Komljenović, Ante; Lisac, Anton, Deur, Joško: “Battery/Ultracapacitor Test Setup Control System Design and Verification”, Proceedings of IEEE Eurocon 2013, pp. 1050-1057, Zagreb, Croatia, 2013.
- [9.] Ljubomir Majdandžić: „Fotonaponski sustavi“
- [10.] Miljenko Kokot: „Emulator rada fotonaponskog panela i neizraziti regulator za praćenje tokčke maksimalne snage na njegovim strujno-naponskim karakteristikama“, Zagreb, 2011.
- [11.] Mihael Lobrović: „Robusna koordinirana regulacija baterijsko-ultrakondenzatorskog sustava za pohranu energije“, Zagreb, 2014.

- [12.] Matija Matijašić: „Projektiranje i analiza točnosti estimatora stanja napunjenosti baterije temeljenog na lineariziranom modelu i Luenbergovom estimatoru“, Zagreb, 2016.
- [13.] Viktor Smetko: „Projektiranje estimatora varijabli stanja i parametara za baterije i ultrakondenzatore“, Zagreb, 2013